

**GUILHERME BRENNER KRAEMER**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO NA  
DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO**



**CURITIBA**

**2007**

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação do homem com o meio ambiente está cada vez mais evidente, em temas importantes, tais como: aquecimento global, poluição ou escassez das águas, a poluição do ar entre outros.

O solo não está fora deste contexto, pois a exploração dos mesmos à exaustão, a ação dos processos erosivos, o assoreamento dos rios, a contaminação das águas por agroquímicos, o desmatamento para expansão agrícola, entre outras, têm contribuído para a perda da qualidade de vida, pouco perceptível ainda nas grandes cidades.

Desta forma, o mapeamento de solos é de grande importância para auxiliar na sua exploração racional, bem como para a restauração daqueles depauperados. Através do mapa de solos podem ser realizadas diversas inferências, como: avaliação dos recursos dos solos para maior eficiência das explorações agrícolas, pastoris e florestais; seleção mais apropriada para trabalhos experimentais; seleção de áreas prioritárias; zoneamento de culturas; zoneamento ecológico; ensino da pedologia; programas de adubação, controle à erosão, reflorestamento, irrigação e drenagem; planejamento de trabalhos de engenharia; planejamento ambiental; confecção de mapas interpretativos (aptidão agrícola e capacidade de uso); e previsão de safra.

No entanto, o mapeamento de solos exige pessoal especializado, grande volume de recursos e tempo para sua execução, tornando-o muitas vezes inviável.

Até a primeira metade do século XX os levantamentos pedológicos basearam-se exclusivamente em um exaustivo trabalho de campo, na dedicação, na experiência e conhecimento em solos pelo pedólogo, tendo como fator limitante o alcance da visão. Com o surgimento da fotografia aérea e a utilização dos métodos clássicos de fotointerpretação o tempo de execução foi reduzido.

No entanto, a interpretação de imagens e compartimentação da paisagem são subjetivas, o que proporciona a discordância dos limites das unidades de mapeamento, mesmo quando executado por especialistas. Em estudos realizados

por diferentes pedólogos em uma mesma área, os mapas gerados apresentaram diferentes limites para as unidades de mapeamento (BIE; BECKETT, 1973).

O surgimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e os sistemas de tratamento de imagens em ambiente computacional, deu ao homem a possibilidade de agilizar ainda mais o processo de mapeamento.

Com todo esse avanço tecnológico e as necessidades de se conhecer o meio físico em detalhes, nota-se a possibilidade do desenvolvimento de técnicas de amostragem, de espacialização da informação, de processamento de dados para redução da subjetividade dos mapeamentos, bem como um melhor entendimento da distribuição dos atributos do solo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Aplicação de critérios de classificação por meio de técnicas de geoprocessamento na delimitação de unidades de mapeamento de solos.

### 1.1.2 Específico

- Avaliar a utilização da geoestatística na espacialização dos atributos do solo;
- Avaliar a utilização da análise booleana na identificação das unidades taxonômicas;
- Aplicar os critérios cartográficos na geração das unidades de mapeamento.

**GUILHERME BRENNER KRAEMER**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO NA  
DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração em Pedologia e Manejo do Solo, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadores: Dr. Luiz Cláudio de Paula Souza  
Dr. Renato Antonio Dedeczek

**CURITIBA**

**2007**

A minha esposa BRUNA  
que muito me apoiou  
e me incentivou  
DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza, pelo apoio, dedicação, conversas motivantes e inquestionável orientação.

Ao orientador, Dr. Renato Antonio Dedecek pelas contribuições.

Ao Prof. Dr. Helio Olimpio da Rocha, pela concessão do seu trado e pelos incentivos.

Ao co-orientador, Prof. Valmiqui da Costa Lima pelas colaborações e ensinamentos.

Ao Curso de Pós Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À fazenda Cangüiri, pela disponibilização dos equipamentos.

Aos laboratoristas, Elda Nazaré Leite Lubasinski, Flori Roberto Margraf Barberi e Reginaldo Bodziak, por toda ajuda prestada.

Ao Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço pelos esclarecimentos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | vi   |
| <b>LISTA DE QUADROS</b> .....   | vii  |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....   | viii |
| <b>LISTA DE FOTOS</b> .....   | ix   |
| <b>RESUMO</b> .....   | x    |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | xi   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 1    |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 2    |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....  | 2    |
| 1.1.2 Objetivos Específicos .....                                       | 2    |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....                                    | 3    |
| 2.1 LEVANTAMENTO DE SOLOS .....   | 3    |
| 2.1.1 Tipos de Levantamento .....                                       | 4    |
| 2.1.2 Levantamentos Realizados .....                                    | 8    |
| 2.1.3 Alguns Atributos Aplicados na Distinção de Classes de Solos ..... | 13   |
| 2.1.3.1 Descrição morfológica .....                                     | 13   |
| 2.1.3.2 Composição granulométrica .....                                 | 14   |
| 2.1.3.3 Características químicas .....                                  | 17   |
| 2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIGs .....                    | 18   |
| 2.2.1 Processos de Interpolação .....                                   | 19   |
| 2.2.2 Geoestatística .....  | 20   |
| 2.2.2.1 Semivariograma .....  | 22   |
| 2.2.2.2 Krigagem .....  | 25   |
| 2.2.3 Análise booleana .....  | 28   |
| 2.3 ALGUMAS APLICAÇÕES NO ESTUDO DE SOLOS .....                         | 30   |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                      | 36   |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO .....                        | 36   |
| 3.1.1 Localização .....   | 36   |
| 3.1.2 Geologia .....  | 37   |
| 3.1.3 Relevo .....  | 38   |
| 3.1.4 Solos .....   | 38   |
| 3.1.5 Vegetação .....   | 39   |
| 3.1.6 Clima .....   | 40   |
| 3.1.7 Hidrografia .....   | 40   |
| 3.2 MATERIAL .....  | 41   |
| 3.2.1 Material de Campo .....   | 41   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.2   | Softwares e Equipamentos .....  | 41 |
| 3.3     | MÉTODOS.....  | 42 |
| 3.3.1   | Coleta das Amostras .....   | 42 |
| 3.3.2   | Descrição Morfológica .....   | 44 |
| 3.3.3   | Análise do Solo.....  | 44 |
| 3.3.4   | Manipulação dos dados em SIG.....   | 45 |
| 3.3.4.1 | Critérios geoestatísticos .....   | 45 |
| 3.3.4.2 | Tomada de decisões e lógica booleana .....  | 47 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | 48 |
| 4.1     | INTERPOLAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO ....  | 48 |
| 4.1.1   | Ajuste do Grau de Dependência Espacial (modelo experimental).....   | 48 |
| 4.1.2   | Ajuste dos Modelos Teóricos aos Experimentais .....   | 51 |
| 4.1.3   | Krigagem .....  | 53 |
| 4.2     | ÁLGEBRA DE MAPAS .....  | 60 |
| 4.2.1   | Critérios e Parâmetros Utilizados para a Classificação até o 3º nível<br>categórico .....                                       | 61 |
| 4.2.2   | Critérios e Parâmetros Utilizados para a Classificação ao nível de<br>Subgrupo.. .....  | 64 |
| 4.3     | ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO POR<br>UNIDADE DE MAPEAMENTO .....   | 73 |
| 4.4     | AVALIAÇÃO DO NÚMERO DE OBSERVAÇÕES POR UNIDADE DE<br>MAPEAMENTO .....   | 77 |
| 4.4     | COMPARATIVO DO MAPA DE SOLOS OBTIDO E O MAPA DE SOLOS<br>DESENVOLVIDO A PARTIR DE MÉTODOS CONVENCIONAIS<br>DE LEVANTAMENTO..... | 78 |
| 5       | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | 82 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 83 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 01 - PRINCIPAIS FEIÇÕES DO SEMIVARIOGRAMA .....   | 24 |
| FIGURA 02 - DIAGRAMA DE VENN E OPERADORES .....  | 29 |
| FIGURA 03 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....  | 36 |
| FIGURA 04 - INTERFACE DO SOFTWARE IDRISI 3.2 PARA O AJUSTE DO GRAU DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL (MODELO EXPERIMENTAL) ..... | 46 |
| FIGURA 05 - INTERFACE DO SOFTWARE IDRISI 3.2 PARA O AJUSTE DO MODELO TEÓRICO AO EXPERIMENTAL.....                      | 46 |
| FIGURA 06 - INTERFACE PARA AJUSTE DOS PARÂMETROS PARA KRIGAGEM.....  | 47 |
| FIGURA 07 - KRIGAGEM DA ARGILA DO HORIZONTE B.....   | 55 |
| FIGURA 08 - KRIGAGEM DO CARBONO DO HORIZONTE B .....   | 56 |
| FIGURA 09 - KRIGAGEM DA ESPESSURA DO HORIZONTE A.....  | 57 |
| FIGURA 10 - KRIGAGENS DOS ATRIBUTOS DOS HORIZONTES A E B.....  | 58 |
| FIGURA 11 - KRIGAGENS DOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE B.....  | 59 |
| FIGURA 12 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS LATOSSOLOS.....   | 61 |
| FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DOS LATOSSOLOS NO 2º NÍVEL CATEGÓRICO.....  | 62 |
| FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DOS LATOSSOLOS NO 3º NÍVEL CATEGÓRICO.....  | 63 |
| FIGURA 15 - MAPA DAS UNIDADES TAXONÔMICAS OCORRENTES EM NÍVEL DE GRANDE GRUPO .....                                    | 63 |
| FIGURA 16 - AGRUPAMENTO DE SOLOS E DELINEAMENTO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO.....  | 65 |
| FIGURA 17 - UNIDADE DE MAPEAMENTO LVAD .....   | 66 |
| FIGURA 18 - DISPOSIÇÃO DOS HORIZONTES A.....   | 67 |
| FIGURA 19 - AGRUPAMENTOS DE CLASSES TEXTURAIS DO HORIZONTE B .....   | 68 |
| FIGURA 20 - MAPA DE DECLIVIDADE.....   | 69 |
| FIGURA 21 - MAPA FINAL DE SOLOS .....  | 72 |
| FIGURA 22 - UNIDADES DE MAPEAMENTO DO LEVANTAMENTO SEMIDETALHADO REALIZADO POR MÉTODOS CONVENCIONAIS.....              | 77 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| QUADRO 01 - SÍNTESE DOS PARÂMETROS ESTABELECIDOS PELA EMBRAPA PARA LEVANTAMENTOS DE SOLOS NO BRASIL..  | 05 |
| QUADRO 02 - FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SEGUNDO ATTERBERG, O CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DO SOLO E O DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS..... | 15 |
| QUADRO 03 - ORDENS QUE PODEM OU NÃO APRESENTAR MUDANÇAS ABRUPTA ATÉ O QUARTO NÍVEL CATEGÓRICO .....  | 16 |
| QUADRO 04 - CTC COMO CRITÉRIO PARA DISTINÇÃO DE HORIZONTES DIAGNÓSTICOS .....  | 17 |
| QUADRO 05 - SÍNTESE DA UNIDADE DE MAPEAMENTO LVAD .....  | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 01 - PARÂMETROS ALCANÇADOS PARA O AJUSTE DOS<br>MODELOS EXPERIMENTAIS REFERENTES AOS ATRIBUTOS<br>DO HORIZONTE A .....           | 49 |
| TABELA 02 - PARÂMETROS ALCANÇADOS PARA AJUSTE DOS MODELOS<br>EXPERIMENTAIS PARA ATRIBUTOS DO HORIZONTE B .....                          | 50 |
| TABELA 03 - PARÂMETROS DAS CURVAS AJUSTADAS SOBRE O<br>MODELO EXPERIMENTAL DOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE<br>A.....                         | 51 |
| TABELA 04 - PARÂMETROS DAS CURVAS AJUSTADAS SOBRE O<br>MODELO EXPERIMENTAL DOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE<br>B.....                         | 52 |
| TABELA 05 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DA KRIGAGEM .....  | 54 |
| TABELA 06 - ÁREA DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO EM PERCENTUAL<br>DE OCORRÊNCIA.....   | 70 |
| TABELA 07 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO POR<br>UNIDADE DE MAPEAMENTO.....   | 73 |
| TABELA 08 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CLASSE DE SOLO<br>PREDOMINANTE NA UNIDADE DE MAPEAMENTO CXBD .....                                   | 76 |
| TABELA 09 - NÚMERO DE OBSERVAÇÕES POR HECTARE E POR<br>UNIDADE DE MAPEAMENTO.....   | 78 |
| TABELA 10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO DAS<br>UNIDADES DE MAPEAMENTO DE LEVANTAMENTOS POR<br>MÉTODOS CONVENCIONAIS ..... | 80 |

## LISTA DE FOTOS

|  |    |
|--|----|
| FOTO 1 - TRADO MECÂNICO ADAPTADO AO TRATOR .....   | 42 |
| FOTO 2 - ENCAIXE DO TUBO DE PVC NO EQUIPAMENTO .....                                       | 43 |
| FOTO 3 - TUBO DE PVC INSTALADO E COM A PONTEIRA ACOPLADA<br>PRONTO PARA A COLETA.....      | 43 |
| FOTO 4 - TUBO DE PVC PREENCHIDO COM AMOSTRA DE SOLO .....                                  | 43 |
| FOTO 5 - TUBO ABERTO PARA IDENTIFICAÇÃO E COLETA DE<br>AMOSTRAS DOS HORIZONTES A E B ..... | 44 |

## RESUMO

Os métodos atuais de levantamentos pedológicos baseiam-se nos trabalhos de interpretação pedológica de fotografias aéreas e compartimentação da paisagem proporcionando grande subjetividade que resulta na discordância dos limites das unidades de mapeamento, mesmo quando executados por especialistas. Este trabalho tem como objetivo a aplicação da geoestatística na espacialização dos atributos do solo e a delimitação das unidades de mapeamento através da técnica booleana. A área de estudo se localiza no Centro de Estações Experimentais do Cangüiri – Universidade Federal do Paraná, situado nas coordenadas N= 7190000 m e E= 688000 m no sistema de projeção UTM. Foram utilizados 135 perfis coletados em tubos de PVC de 100mm, através de um trado mecânico acoplado na tomada de força de um trator. Os pontos amostrados correspondem a uma sistema de malha, com espaçamento de 30 m x 30 m, tendo ainda 12 pontos amostrados em espaçamento variando entre 1 m e 15 m. Foram realizadas análises granulométrica e química dos elementos cálcio, magnésio, potássio, alumínio, hidrogênio, fósforo, carbono, pH em água e pH em KCL dos horizontes A e B. Os dados obtidos foram transferidos para vetores de pontos. A krigagem dos atributos do solo resultou em imagens contínuas de representação das variações de cada atributo. Através da análise booleana, se utilizou os parâmetros e critérios de classificação de solos estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), para a espacialização das classes de solos. Estas foram submetidas aos critérios cartográficos de representação, onde foram obtidos os limites das unidades de mapeamento simples e associações. Os resultados geoestatísticos trabalhados em conjunto na rotina booleana mostraram ser capazes de classificar e delinear unidades de mapeamento de solos. Este resultado mostra ser possível informatizar o processo de classificação de solos, proporcionando mais velocidade e menos subjetividade no delineamento das unidades de mapeamento.

Palavras-chave: mapeamento de solos; geoestatística; SIG.

## ABSTRACT

The current methods of soil surveys is originated in the works of pedologic interpretation of aerial photography and landscape compartmentation providing great subjectivity that results in the discord of the limits of the mapping units, even when executed by specialists. The aim of this study was the application of geostatistics in the spatialization of the attributes of soil and the delimitation of mapping units using the Boolean technique. The study was undertaken at the Centro de Estações Experimentais do Cangüiri –Universidade Federal do Paraná, in the coordinates N = 7190000m and E = 688000 in projection system UTM. It was utilized 135 profiles which were collected in PVC tubes with 100 mm, using a mechanic corer connected to a tractor power plug. From these 135 profiles, 123 spots sampled correspond to a net system, with 30m x 30m, and other 12 spots sampled correspond to a variation between 1 and 15 m. It was done granulometric and chemical analyses of Ca, Mg, K, Al, H, P, C, pH H<sub>2</sub>O and pH KCl of the horizons A and B. The data were transferred to vector points. The kriging of soil attributes resulted in continuous images which represent the variation of each attribute. Using the Boolean analysis, it was applied the parameters and criteria of soil classification according to the Brazilian System of Soil Classification, for the spacialization of soil classes. These were submitted to the cartographic criterion of representation, where it was obtained the border of the simple mapping units and associations. The geostatistics results utilized together with the Boolean analyses routine showed that it is possible to classify and delineate mapping units of soils. The result also shows that it is possible the use of computer technology in the process of soils classification, which provides faster classification processes and less subjectivity in the delineation of mapping units.

Key words: soils mapping, geostatistics; GIS.

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação do homem com o meio ambiente está cada vez mais evidente, em temas importantes, tais como: aquecimento global, poluição ou escassez das águas, a poluição do ar entre outros.

O solo não está fora deste contexto, pois a exploração dos mesmos à exaustão, a ação dos processos erosivos, o assoreamento dos rios, a contaminação das águas por agroquímicos, o desmatamento para expansão agrícola, entre outras, têm contribuído para a perda da qualidade de vida, pouco perceptível ainda nas grandes cidades.

Desta forma, o mapeamento de solos é de grande importância para auxiliar na sua exploração racional, bem como para a restauração daqueles depauperados. Através do mapa de solos podem ser realizadas diversas inferências, como: avaliação dos recursos dos solos para maior eficiência das explorações agrícolas, pastoris e florestais; seleção mais apropriada para trabalhos experimentais; seleção de áreas prioritárias; zoneamento de culturas; zoneamento ecológico; ensino da pedologia; programas de adubação, controle à erosão, reflorestamento, irrigação e drenagem; planejamento de trabalhos de engenharia; planejamento ambiental; confecção de mapas interpretativos (aptidão agrícola e capacidade de uso); e previsão de safra.

No entanto, o mapeamento de solos exige pessoal especializado, grande volume de recursos e tempo para sua execução, tornando-o muitas vezes inviável.

Até a primeira metade do século XX os levantamentos pedológicos basearam-se exclusivamente em um exaustivo trabalho de campo, na dedicação, na experiência e conhecimento em solos pelo pedólogo, tendo como fator limitante o alcance da visão. Com o surgimento da fotografia aérea e a utilização dos métodos clássicos de fotointerpretação o tempo de execução foi reduzido.

No entanto, a interpretação de imagens e compartimentação da paisagem são subjetivas, o que proporciona a discordância dos limites das unidades de mapeamento, mesmo quando executado por especialistas. Em estudos realizados

por diferentes pedólogos em uma mesma área, os mapas gerados apresentaram diferentes limites para as unidades de mapeamento (BIE; BECKETT, 1973).

O surgimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e os sistemas de tratamento de imagens em ambiente computacional, deu ao homem a possibilidade de agilizar ainda mais o processo de mapeamento.

Com todo esse avanço tecnológico e as necessidades de se conhecer o meio físico em detalhes, nota-se a possibilidade do desenvolvimento de técnicas de amostragem, de espacialização da informação, de processamento de dados para redução da subjetividade dos mapeamentos, bem como um melhor entendimento da distribuição dos atributos do solo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Aplicação de critérios de classificação por meio de técnicas de geoprocessamento na delimitação de unidades de mapeamento de solos.

### 1.1.2 Específico

- Avaliar a utilização da geoestatística na espacialização dos atributos do solo;
- Avaliar a utilização da análise booleana na identificação das unidades taxonômicas;
- Aplicar os critérios cartográficos na geração das unidades de mapeamento.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo está organizado em quatro compartimentos, que são: levantamento de solos, sistema de informação geográfica, geoestatística e análise booleana.

Tal ordenação visa mostrar conceitos, parâmetros e metodologias usados em levantamentos de solos no Brasil.

No que se refere à geoestatística, além da definição técnica, aborda o estado atual da sua utilização em levantamentos de solos.

Finalmente, a análise booleana e seus conceitos básicos, pois a mesma foi utilizada na identificação das unidades taxonômicas.

### 2.1 LEVANTAMENTO DE SOLOS

As informações presentes neste tópico foram extraídas da publicação Procedimentos Normativos para Levantamento de Solos da EMBRAPA (1995). Isto se deve ao fato de que tal publicação atualmente é a que rege os critérios para levantamento de solos realizados no País.

Um levantamento de solos é um diagnóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, prevendo e delineando suas áreas nos mapas, em termos de classes definidas.

Conceitualmente, classe de solo é o mesmo que unidade taxonômica, definida como um grupamento de indivíduos semelhantes conhecidos por estudo de pedons e polipedons. Unidades de mapeamento são áreas de solos definidas em função das unidades taxonômicas que as compõem, sendo definidas para possibilitar a representação cartográfica e mostrar a distribuição espacial das unidades taxonômicas.

Uma unidade de mapeamento simples é denominada pelo nome de uma única unidade taxonômica, sendo mínimas as variações das características e

propriedades, com no mínimo 70% dos pedons pertencentes à classe de solos que lhe dá o nome.

Associações são unidades de mapeamento constituídas por duas ou mais classes de solos, com limites nítidos ou pouco nítidos entre si, podendo ser separadas em levantamentos mais detalhados.

Os complexos constituem em duas ou mais classes de solos distintas, mas não mapeáveis como unidades individuais. São classes de solos incapazes de serem mapeáveis separadamente, mesmo em grandes escalas.

Os métodos de prospecção variam em função do tipo de levantamento, sendo: método do caminhar livre; investigações ao longo de transeções; levantamento de áreas piloto; estudos de toposequências; e sistema de malhas.

São sugeridos para os diferentes tipos de levantamentos pedológicos os seguintes números de observações: levantamento ultradetalhado: >4 obs/ha; detalhados: 0,20 – 4 obs/ha; semidetalhados: 0,02 – 0,20 obs/ha; reconhecimento: 0,04 – 2 obs/km<sup>2</sup>; exploratório: menos de 0,04 obs/km<sup>2</sup>; não especifica parâmetros para esquemáticos.

### 2.1.1 Tipos de Levantamentos

Os tipos de levantamentos de solos estão em função dos objetivos a serem alcançados (EMBRAPA, 1995). Variam também em função do nível de detalhe, referente ao grau de segurança e o número de previsões a respeito de determinado local representado no mapa (RESENDE et al., 2002).

A seguir são apresentados de forma reduzida, no quadro 01, os propósitos de cada um dos tipos de levantamento de solos de acordo com a EMBRAPA (1995).

| QUADRO 01 – SÍNTESE DOS PARÂMETROS ESTABELECIDOS PELA EMBRAPA PARA MAPEAMENTO DE SOLOS. |   |                              |  |  |  |   |
|---|---|------------------------------|--|--|--|---|
| <b>Tipos de levantamento</b>  | <b>Objetivo</b>   | <b>Escala de publicação</b>  | <b>Tipo de unidade de mapeamento</b>   | <b>Método de análise</b>   | <b>Área mínima mapeada / dens. observações</b>                                 | <b>Método de prospecção</b>   |
| Esquemático   | Informação generalizada sobre a distribuição de solos de um país, continente ou região.           | Menor ou igual a 1:1.000.000 | Associação de classes de solos de alto nível categórico (ordem, subordem)  | Generalizações de classes com dados e mapas já existentes, com ou sem fotointerpretação e amplas correlações com o meio ambiente | Maior que 40 km <sup>2</sup> / sem especificação                               | Caminhamento livre  |
| Exploratório  | Avaliação qualitativa dos solos de regiões e pré-avaliações para levantamentos em escalas maiores | De 1:750.000 a 1:2.500.000   | Associação em subdivisões de classes de solos de alto nível categórico (ordem, subordem)   | Identificação no campo a grandes intervalos e extrapolação de mapas já existentes e/ou fotointerpretação                         | 22,5 km <sup>2</sup> a 250 km <sup>2</sup> / < 0,04 obs. por km <sup>2</sup>   | Áreas piloto ou transções com pontos de amostragem rigidamente estabelecidos  |
| Reconhecimento (baixa intensidade)  | Estimar o potencial de solos em estados ou territórios  | De 1:250.000 a 1:750.000     | Unidades simples ou associação de até quatro componentes de grandes grupos. Inclusões de outras classes de solos são comuns. Composição nas unidades de mapeamento entre 50 e 70% de confiabilidade. | Identificação no campo a grandes intervalos, determinados por fotointerpretação ou mapas e extrapolação.                         | 2,5 km <sup>2</sup> a 22,5 km <sup>2</sup> / 0,04 a 2 obs. por km <sup>2</sup> | Transeções, com observações detectando as variações na paisagem em intervalos regulares ou quando se perceber mudança na classe de solo |

| QUADRO 01 – CONTINUAÇÃO            |   |                             |   |   |   |                             |
|------------------------------------|---|-----------------------------|---|---|---|-----------------------------|
| <b>Tipos de levantamento</b>       | <b>Objetivo</b>   | <b>Escala de publicação</b> | <b>Tipo de unidade de mapeamento</b>  | <b>Método de análise</b>  | <b>Área mínima mapeada / dens. observações</b>                  | <b>Método de prospecção</b> |
| Reconhecimento (média intensidade) | Avaliação qualitativa e quantitativa aproximada dos solos visando elaboração de projetos de desenvolvimento agrícola. | 1:100.000 a 1:250.000       | Unidades simples ou associação de até quatro componentes de grandes grupos. Composição nas unidades de mapeamento entre 70 e 80% de confiabilidade. | Observações no campo a médios intervalos e fotointerpretação. Correlações solo/paisagem   | 40 ha a 2,5 km <sup>2</sup> / 0,04 a 2 obs. por km <sup>2</sup> |                             |
| Reconhecimento (alta intensidade)  | Avaliação qualitativa e quantitativa de recursos de solos em áreas prioritárias para desenvolvimento agrícola         | 1:50.000 a 1:100.000        | Unidades simples ou associação de até três componentes de subgrupos. Composição e pureza nas unidades em torno de 80% de confiabilidade.            | Observações no campo a pequenos intervalos. Limites obtidos por fotointerpretação e verificados no campo com correlações solo/paisagem. | 10 ha a 40 ha / 0,04 a 2 obs. por km <sup>2</sup>               |                             |

| QUADRO 01 – CONTINUAÇÃO |   |                           |  |   |   |   |
|-------------------------|---|---------------------------|--|---|---|---|
| Tipos de levantamento   | Objetivo  | Escala de publicação      | Tipo de unidade de mapeamento  | Método de análise   | Área mínima mapeada / dens. observações | Método de prospecção                              |
| Semidetalhado           | Planejamento de áreas para uso potencial agrícola e conservação de solos  | 1:20.000 a 1:100.000      | Unidades simples, complexos e associações, definidas ao nível de família. As inclusões em unidades simples não ultrapassam 15% e 20% nas associações | Identificação no campo, a pequenos intervalos em toposequências. Limites determinados por fotointerpretação e verificados no campo. Correlações solo/paisagem                           | 2,5 ha a 40 ha / 0,02 a 0,2 obs. por ha | Investigação de toposequência                     |
| Detalhado               | Projetos conservacionistas, áreas experimentais, uso e manejo de áreas agrícolas, pastoris e florestais intensivos, projeto de irrigação e engenharia | 1:10.000 a 1:20.000       | Unidades simples e associações constituídas de séries e fases de séries, admitindo até 15% de inclusões de outros solos.                             | Identificação no campo por observações sistemáticas ao longo de toposequências. Limites verificados por fotointerpretação e verificados sistematicamente no campo a pequenos intervalos | 0,4 ha a 1,6 ha / 0,2 a 4 obs. por ha   | Investigação de toposequência ou sistema de malha |
| Ultra-detalhado         | Parcelas experimentais e projetos especiais de irrigação  | Maior ou igual a 1:10.000 | Unidades simples constituídas por fases de séries, com tantas subdivisões necessárias, para distinguir pequenas variações entre classes de solos     | Identificados no campo a intervalos mínimos entre observações. Limites totalmente percorridos no campo (antes F.I.) em malhas ortogonais  | Menor que 0,4 ha / > 4 obs. Por ha      | Sistema de malha                                  |

Fonte: EMBRAPA (1995), adaptado por Kraemer.

Observa-se no quadro que a escala do material cartográfico (cartas, fotografias e imagens), o número de observações, a escala de publicação e a área mínima mapeável, aumentam conforme o nível de detalhe que se propõe em cada tipo de levantamento.

### 2.1.2 Levantamentos realizados

Camargo e Bennema (1966) realizaram levantamento esquemático de solos do Brasil com objetivo de suprir a deficiência de informações de solos, sendo que até aquele momento existiam apenas informações dispersas ou divergentes. Este trabalho foi realizado com áreas onde existiam levantamentos de solos e parte foi desenvolvida por processo de extrapolação, tomando como base dados das áreas contíguas já levantadas. Este trabalho foi publicado em escala 1:10.000.000, permitindo fazer um esboço dos solos do Brasil. Os autores não especificam quantidades de observações, podendo inferir que este levantamento baseou-se em dados secundários.

Se comparado com o sistema atual de classificação de solos, as unidades de mapeamento descritas são associações de solos ao nível categórico de subordem. Os critérios adotados no levantamento mencionado atendem aos requisitos propostos pela EMBRAPA (1995), fato que pode ser observado no Quadro 01 apresentado anteriormente.

EMBRAPA (1976), com objetivo de fornecer uma visão generalizada da ocorrência dos solos da margem esquerda do rio São Francisco (Estado da Bahia) em uma área de 170.772 km<sup>2</sup>, executou trabalho em nível intermediário ao levantamento exploratório e o de reconhecimento.

O material cartográfico utilizado foram mapas plani-altimétricos de escalas 1:500.000 e 1:250.000, sendo utilizados também foto-índices na escala 1:100.000.

Com base no estudo dos perfis, complementado com os estudos de correlações, estabeleceu-se o conceito das várias unidades de mapeamento,

segundo o esquema de classificação *Supplement to soil classification system* (1967)<sup>1</sup>

Foram descritos e coletados 102 perfis, seguindo as normas e definições constantes no Soil Survey Manual (1951)<sup>2</sup> e no Manual de Método de Trabalho de Campo, conforme Lemos e Santos (1967)<sup>3</sup>.

O mapa final de solos foi elaborado na escala 1:1.000.000, contendo 76 associações descritas ao nível de grande grupo, com uma observação feita a cada 1.674,24 km<sup>2</sup>.

Observa-se que em determinadas fases do trabalho, adotaram-se critérios e parâmetros estabelecidos por diferentes instituições ou autores. Isso mostra que no período em que foi executado, não havia uma única instituição ou órgão que regulamentasse o trabalho de classificação e levantamento de solos.

Nota-se que a escala de publicação e a quantidade de observações estão de acordo com o sugerido pela EMBRAPA (1995) para levantamentos exploratórios. Entretanto o nível categórico atingido nas unidades de mapeamento é de grande grupo.

No levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná publicado na escala 1:600.000 (EMBRAPA, 1984), a área total mapeada foi de 199.218 km<sup>2</sup>, e para isso utilizaram-se fotografias aéreas na escala aproximada de 1:70.000, as quais estão em escala maior do que a recomendada.

Traçados os limites das diversas unidades, procedeu-se a coleta de amostras de solos, superficiais e subsuperficiais.

Para atender as exigências pedológicas e agrícolas, o mapeamento deu-se pelo menos ao nível de Grande Grupo. Portanto, os solos foram separados ao nível categórico de fases de Grande Grupo, sendo utilizados para fasar as unidades a vegetação, o relevo e a presença de pedras ou afloramentos de rochas.

O mapa final é constituído por unidades simples e associações formadas por duas ou três unidades taxonômicas, nas regiões onde a distribuição geográfica dos

---

<sup>1</sup> US. Supplement to soil classification system (7<sup>th</sup> approximation). Washington, DC., 1967.

<sup>2</sup> US. Soil Survey Staff. Soil survey manual. Washington, DC., Department of Agriculture, 1951. 503. (handbook 18)

<sup>3</sup> LEMOS, R.C. de et al. Manual de método de trabalho de campo. 2. aproximação. Rio de Janeiro, SBCIS, 1967.

solos é muito intrincada, tendo ainda inclusões em ambos os tipos de unidades de mapeamento (EMBRAPA, 1984).

Os critérios adotados no levantamento mencionado atendem aos requisitos propostos pela EMBRAPA (1995) para levantamento de reconhecimento. No entanto, não foi possível fazer alguma inferência quanto ao método de prospecção e a densidade de observações, pois a bibliografia consultada não especificou estes critérios.

O trabalho de levantamento de reconhecimento de solos realizado no estado de Santa Catarina (LEVANTAMENTO..., 1972) mapeou uma área de 95.958 km<sup>2</sup>. Realizou-se a compartimentação da paisagem através de fotointerpretação (fotografias na escala 1:60.000).

Foram coletados no total 126 perfis de solos e um monólito por unidade de mapeamento, em local mais representativo. Para a classificação dos solos e diferenciação das unidades de mapeamento foram adotados os conceitos da FAO (1970)<sup>4</sup>, da Divisão de Pesquisa Pedológica (1962)<sup>5</sup> e do Departamento de Agricultura do Estados Unidos da América do Norte (1951)<sup>6</sup>, para a caracterização dos dados analíticos.

Para a classificação dos solos ao nível de subgrupo utilizou-se a classificação brasileira proposta pela Divisão de Pesquisa Pedológica (1962)<sup>5</sup>. O mapa final foi publicado na escala 1:500.000, contendo 81 unidades de mapeamento, das quais 20 são associações de solos nos níveis de grande grupo e subgrupo. Este levantamento apresentou um índice de 0,002 obs./km<sup>2</sup>.

Este trabalho enquadra-se atualmente em todos os parâmetros especificados pela EMBRAPA (1995) para levantamentos de reconhecimento de média intensidade, com exceção no que se refere à quantidade de observações por hectare.

Outro levantamento de reconhecimento já realizado no Brasil deu-se em parte do estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1967) em uma área de 80.000 km<sup>2</sup>.

---

<sup>4</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Key to soil units for soil map of the world. Land Water Div. Roma. 1970.

<sup>5</sup> Divisão de Pesquisa Pedológica. Classificação de solos brasileiros. I Reunião Técnica DPFS. Rio de Janeiro, 1962. (mimeografado).

<sup>6</sup> US. Department of Agriculture. Soil survey manual: supplement to soil classification system (7<sup>th</sup> approximation). Washington, DC.: USDA, 1951.



Foi feita a descrição de 39 perfis seguindo as normas do Soil Survey Manual (1951)<sup>7</sup> e do Manual de Métodos de Trabalho de Campo (1967)<sup>8</sup>.

Estas situações nos permitem realizar algumas observações, quando analisadas junto aos parâmetros da EMBRAPA (1995). O tipo de levantamento realizado foi reconhecimento. No entanto, as unidades de mapeamento atingiram níveis categóricos variando de subordem a série, sendo o mapa final publicado na escala 1:1.000.000.

Um levantamento semidetalhado foi realizado no Jardim Botânico de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 1990), com área de 440 ha. O material básico utilizado para a delimitação das unidades de mapeamento foram fotografias aéreas na escala 1:10.000. No entanto, os critérios estabelecidos pela EMBRAPA (1995) para este tipo de levantamento sugere escala fotográfica variando entre 1:20.000 e 1:60.000.

No mapa final constam 21 unidades de mapeamento (simples e associações), o que dá um índice de 0,1 observação por hectare, sendo publicado na escala 1:10.000. Ao analisar o mapa final, verifica-se que a escala de publicação, o nível categórico atingido pelas unidades e o material base utilizado, não estão de acordo com EMBRAPA (1995).

Também no Distrito Federal foi realizado trabalho de levantamento de solos do tipo semidetalhado (BRASIL, 1966). Observa-se que a metodologia utilizada para a criação da legenda preliminar, a elaboração dos conceitos das unidades de mapeamento e os trabalhos de criação de novas unidade e melhoria da legenda, é a mesma utilizada para os levantamentos em nível de detalhe. No entanto, a classificação dos solos contidos nas unidades de mapeamento (nível de grande grupo e imediatamente inferior), a escala da base cartográfica e fotografias aéreas utilizadas, a escala de publicação do mapa final e o número de observações por hectare, não se enquadram nas especificações para este tipo de levantamento, mas em levantamentos de reconhecimento (EMBRAPA, 1995).

Oliveira e Prado (1984), em levantamento semidetalhado do estado de São Paulo: Quadrícula São Carlos II, mapearam uma área de 285.891 hectares os quais

---

<sup>7</sup> US. Soil Survey Staff. Soil survey manual. Washington, DC., Departament of Agriculture, 1951. 503 (handbook 18).

<sup>8</sup> LEMOS, R.C. de et al. Manual de método de trabalho de campo. 2 aproximação. Rio de Janeiro: SBCIS, 1967.

foram divididos em 60 unidades de mapeamento. Em todas estas unidades foram observados 1.700 pontos.

O mais interessante neste trabalho é que os autores fazem uma análise estatística das observações por unidade de mapeamento, objetivando fornecer uma idéia da variabilidade de características analíticas. São apresentados sob a forma de um quadro os seguintes dados: a média; o limite de confiança, mínimo, máximo e coeficiente de variação de várias características da camada superficial (A) e subsuperficial (B) de cada unidade de mapeamento (OLIVEIRA; PRADO, 1984).

Para isso eles se basearam no fato de que áreas aparentemente homogêneas, pelos aspectos externos da paisagem, freqüentemente apresentam solos com sensíveis variações em diversas características analíticas, especialmente químicas e físico-químicas. Devido ao fato de não haver relação entre a morfologia do solo e as características analíticas diferenciais, torna-se difícil a separação no campo desses solos em baixo nível categórico.

No levantamento detalhado de solos orgânicos realizado na margem esquerda do baixo curso do rio Ribeira em uma área de 1.400 ha (IAC, 1987), o material base utilizado para o levantamento foram fotografias aéreas na escala 1:25.000 e cartas topográficas na escala 1:20.000 com curvas de nível em intervalos de 0,25 m. Com base neste material executou-se trabalho de campo para reconhecimento geral da área onde foram feitas descrições morfológicas de perfis.

Estabelecidos os critérios para identificação das unidades de mapeamento, foram realizadas 190 observações em pontos dispostos em sistema de malha, que permitiu avaliar a variabilidade dos solos.

Este levantamento apresentou um índice de 0,13 observação por hectare. Percebe-se que o resultado enquadra-se nos parâmetros estabelecidos para levantamentos detalhados quanto ao número de observações e nível categórico, não apresentando a escala recomendada (EMBRAPA, 1995).

No entanto, percebe-se a inexistência de um único critério ou sistema de classificação de solos. Determinados levantamentos baseiam-se nos critérios da FAO, outros no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte, no SNLCS, na Sociedade Brasileira de Ciência do Solo ou no sistema americano.

Percebe-se que os trabalhos aqui citados possuem metodologias de fontes e datas distintas, mesmo assim atenderam em parte os critérios para levantamento de solos vigentes no país.

A partir da publicação EMBRAPA (1995) que normatiza os critérios para levantamentos pedológicos e com a publicação do “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos” (EMBRAPA, 1999) que especifica os critérios de classificação ao 4º nível categórico (subgrupo), determinou-se os parâmetros que regem os trabalhos de levantamentos de solos.

### 2.1.3 Alguns atributos aplicados na distinção de classes de solos

De acordo com EMBRAPA (1999), a classificação de solos é realizada com base em dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, permitindo ainda diagnosticar suas qualidades e limitações para a utilização agrícola entre outras. Neste item, não será abordada a mineralogia, pois o mapa de solos não visa atingir níveis de classificação mais baixos que subgrupo.

#### 2.1.3.1 Descrição morfológica

Lima (2004) relata que as características morfológicas, quando analisadas e devidamente interpretadas juntamente com características físicas, químicas e mineralógicas, possibilitam enquadrar um solo em um sistema taxonômico de classificação, identificando ainda suas limitações e qualidades.

Segundo Lemos e Santos (1996), a morfologia é descrita em campo pelo exame e descrição do perfil do solo, devendo incluir a identificação dos horizontes e as descrições individuais, caracterizando a profundidade, espessura, cor, textura, consistência etc, indicando provável classe de solo.

EMBRAPA (1999) cita a espessura do horizonte e profundidade do solo como fatores para identificar horizontes diagnósticos de subsuperfície e superfície, que permitirão classificar o solo ao nível de ordem. Para ser caracterizado, o horizonte B

latossólico necessita de espessura mínima de 50 cm; o horizonte B textural deve ter pelo menos 10% da soma das espessuras dos horizontes subjacentes e no mínimo 7,5 cm, ou ter pelo menos 15 cm se os horizontes A e B somarem mais que 150 cm; o horizonte B incipiente deve apresentar espessura inferior a 50 cm; o horizonte B espódico apresentar espessura mínima de 2,5 cm; os horizontes litoplântico, fragpã, duripã e petrocálcico devem ser >10 cm; os horizontes glei, cálcico e sulfúrico se apresentam com no mínimo de 15 cm; o horizonte E álbico deve possuir no mínimo 1 cm; o horizonte vértico deve apresentar no mínimo 20 cm; o horizonte B nítrico tem espessura > 30 cm, a não ser que o solo apresente contato lítico nos primeiros 50 cm de profundidade, quando deve apresentar 15 cm ou mais de espessura. O horizonte hístico deve apresentar espessura igual ou maior que 20 cm; A chernozêmico e A proeminente devem apresentar 10 cm ou mais, se o horizonte apresentar contato com a rocha, no mínimo 18 cm e mais que um terço da espessura do solo, se tiver menos que 75 cm de espessura e no mínimo 25 cm, incluindo horizontes transicionais se o solo tiver 75 cm ou mais de espessura; A fraco deve conter espessura menor que 5 cm; a húmico é identificado aplicando-se o valor da profundidade em uma fórmula para que envolve outras variáveis.

Segundo Oliveira (2005), a cor do solo pode ser associada às condições de drenagem do solo, é um indicador do teor de óxidos de ferro e matéria orgânica. Conforme EMBRAPA (1999), a cor permite classificar os solos ao 2º nível categórico, diferenciando solos amarelos (matiz mais amarelo que 5YR), vermelhos-amarelos (matiz 5YR) e vermelhos (matiz mais vermelho que 2,5YR).

Menciona ainda que a notação *Munsell* (matiz, valor e croma) completa é utilizada para identificar horizontes diagnósticos como todos os horizontes A, horizonte E álbico, horizonte glei e como atributo diagnóstico da classe dos Argissolos Acizentados.

#### 2.1.3.2 Composição granulométrica

O termo “composição granulométrica” é empregado com referência ao conjunto de todas as partículas do solo; o termo “textura” para o conjunto de frações

minerais contidas na terra fina seca ao ar com diâmetro inferior a 2mm; e o termo “esqueleto do solo” é atribuído geralmente às partículas com dimensões superiores a 2 mm (OLIVEIRA, 2005).

No Quadro 02 são apresentadas as classes granulométricas já utilizadas em levantamentos de solos no Brasil. No entanto atualmente utiliza-se os critérios estabelecidos pela EMBRAPA.

QUADRO 02 – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SEGUNDO ATTERBERG, O CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DO SOLO (EMBRAPA, 1995) E O DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS (ESTADOS UNIDOS, 1951)

| ATTERBERG                                  | EMBRAPA             | ESTADOS UNIDOS             |
|--|---------------------|----------------------------|
| Frações grosseiras (cm)                    |                     |                            |
| Matação > 20                               | ---                 | ---                        |
| Calhaus 20-2                               | Calhaus 20-2        | ---                        |
| Cascalho 2-0,2                             | Cascalho 2-0,2      | Cascalho 7-2,5             |
| Frações finas (terra fina seca ao ar) (mm) |                     |                            |
| ---  | ---                 | Areia muito grossa 2-1     |
| Areia grossa 2-0,2                         | Areia grossa 2-0,2  | Areia grossa 1-0,5         |
| ---  | ---                 | Areia média 0,5-0,25       |
| Areia fina 0,2-0,02                        | Areia fina 0,2-0,05 | Areia fina 0,25-0,01       |
| ---  | ---                 | Areia muito fina 0,01-0,05 |
| Silte 0,02-0,002                           | Silte 0,05-0,002    | Silte 0,05-0,002           |
| Argila < 0,002                             | Argila < 0,002      | Argila < 0,002             |

Fonte: Oliveira, 2005 adaptado por Kraemer.

Lemos e Santos (1996) descrevem as classes texturais para classificação granulométrica dos horizontes do solo, conforme variam as proporções de areia, silte e argila, sendo elas: muito argilosa, argilosa, argila siltosa, argila arenosa, franco argilo siltoso, franco argiloso, franco argilo arenoso, silte, franco siltoso, franco, franco arenoso, areia franca e areia. As classes texturais pertencem ao conjunto de critérios para classificação ao quinto nível categórico (EMBRAPA, 1999) sendo utilizadas para identificar características que afetam o uso e manejo do solo.

Segundo EMBRAPA (1999), através da análise granulométrica completa é possível identificar alguns atributos diagnósticos importantes para a classificação dos solos no 1º nível categórico como o gradiente textural, que consiste em um considerável aumento no teor de argila dentro de pequena distância entre o horizonte A ou E e o horizonte B e a relação silte/argila, que é considerada como um índice de intemperismo. Ainda no primeiro nível categórico, as classes texturais são

consideradas para a identificação de horizontes diagnósticos subsuperficiais como: B textural (textura media, argilosa ou muito argilosa), B latossólico e B incipiente (textura franco-arenosa ou mais fina), B espódico (textura arenosa ou média), horizonte plântico (textura franco arenosa ou mais fina quando não consolidado), fragipã (textura média, podendo apresentar textura arenosa ou argilosa). As classes granulométricas são utilizadas ainda para classificar alguns solos no quarto e quinto nível categórico que corresponde respectivamente à família e série.

OLIVEIRA (2005) afirma que a mudança textural abrupta é um dos atributos diagnósticos dos solos de maior relevância dos pontos de vista agrônomo e geotécnico, pois indica a presença de horizontes contrastantes no comportamento físico, em especial na dinâmica da água.

A análise granulométrica completa permite identificar solos que apresentam ou não mudança textural abrupta até o quarto nível categórico (Quadro 03).

QUADRO 03 - ORDENS QUE PODEM OU NÃO APRESENTAR MUDANÇA ABRUPTA ATÉ O QUARTO NÍVEL CATEGÓRICO

| Ordens que não apresentam classes de solos com mudança textural abrupta | Ordens que podem apresentar classes de solos com mudança textural abrupta | Ordens que sempre apresentam mudança textural abrupta |
|---|---|---|
| Cambissolos   | Alissolos   | Planossolos   |
| Gleissolos  | Argissolos  |   |
| Latossolos  | Chernossolos  |   |
| Neossolos   | Luvissolos  |   |
| Nitossolos  | Planossolos   |   |
| Organossolos  | Plintossolos  |   |
| Vertissolos   |   |   |
| Espodossolos  |   |   |

Fonte: OLIVEIRA (2005) adaptado por Kraemer

### 2.1.3.3 Características Químicas

Conforme EMBRAPA (1999), os dados químicos das amostras de solo são obtidos em laboratório, permitindo identificar importantes atributos diagnósticos, que possibilitam classificar os solos até o 6º nível categórico.

O valor “S” representa a soma das bases trocáveis (Ca + Mg + K + Na).

O valor “V” representa a porcentagem da CTC ocupada pelas bases trocáveis, calculada através de  $V\% = 100.S/CTC$ . É utilizada como índice geral de fertilidade. Este critério se aplica para distinguir classes de solos, quando por definição, ao nível de ordem, como os Vertissolos que devem apresentar alta saturação por bases ( $\geq 50\%$ ). Ao nível de grande grupo, para solos de alta fertilidade (eutróficos,  $V \geq 50\%$ ) e de baixa fertilidade (distróficos,  $V < 50\%$ ).

A CTC corresponde à capacidade de troca de cátions, ou seja à quantidade de cátions que um solo pode reter em função da quantidade de cargas elétricas negativas, calculada pela expressão  $CTC = Ca + Mg + K + Na + H + Al$ . Este critério é utilizado quanto por definição em solos de baixa CTC (EMBRAPA, 1999) (Quadro 04) .

A atividade da fração argila, calculada pela expressão  $CTC \times 100 / \%$  de argila, corresponde à CTC da argila. Aplica-se o critério de 27cmolc/kg para distinguir classes de solos, sendo os valores maior que 27 cmolc/kg solos de argila de atividade alta e os inferiores a este valor apresentam atividades baixa. Para essa distinção é considerada a atividade das argilas no horizonte B ou no C (EMBRAPA, 1999). Este critério permite identificar importantes horizontes diagnósticos, como mostra o Quadro 04.

QUADRO 04 – CTC COMO CRITÉRIO PARA DISTINÇÃO DE HORIZONTES DIAGNÓSTICOS.

| Horizontes                 | CTC (cmolc / kg) | Aividade da argila (cmolc / kg) |
|----------------------------|------------------|---------------------------------|
| B latossólico (latossolos) | <17              | < 27                            |
| B incipiente (cambissolos) | $\geq 17$        | $\geq 27$                       |

Fonte: EMBRAPA (1999)

O valor “m%” é a porcentagem de saturação por alumínio e expressa a toxidez do solo ( $m\% = 100.AI / AI + S$ ). Refere-se à porcentagem da CTC efetiva ocupada por alumínio. Em geral, quanto mais ácido o solo maior o teor em alumínio e menores os teores de cálcio, magnésio, potássio, sódio, menor a soma de bases (valor S) e maior a porcentagem de saturação por alumínio (valor m%). Solos álicos são distróficos (baixa fertilidade) e possuem alta saturação por alumínio ( $m\% \geq 50\%$  e  $V\% < 50\%$ ) (LIMA, 2004).

## 2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIGs

Sistema é o conjunto de elementos entre os quais há alguma relação, onde todos os componentes atuam juntos para obter e/ ou proporcionar um objetivo comum (SILVA, 1999).

Informação é o resultado da interpretação e processamento de dados.

Segundo Silva (1999), os “Sistemas de Informações Geográficas são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui o ferramental necessário para realizar análises com dados espaciais e, oferece, ao ser implementada, alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico, compondo o chamado universo da geotecnologia”.

Um Sistema de Informações Geográfica – SIG é um sistema baseado em computador que permite capturar, manipular, modelar, consultar, recuperar, analisar e exibir dados geograficamente localizados por um conjunto de coordenadas (Câmara Neto, 1995).

Um SIG pode ser utilizado para solução e monitoramento de problemas ambientais, urbanos, agrícolas, de saúde, florestais e sócio-econômicos.

A diversidade de usos e aplicações abre espaço para várias definições de SIG, como a definição de Dueker (1979), Ozemoy, Smith e Sicherman (1981), Burrough (1986), Devine e Field (1986), Opershaw (1987), DOE (1987), Smith et al. (1987), Parker (1988), Cowen (1988), FICC (1988), Parent (1988), Hainigan (1988), Aronoff (1989), Carter (1989), Koshkarirov, Tikunov e Trokimov (1989), Star e Estes (1990) e Goodchild (1991).



É importante ressaltar que a qualidade dos dados é muito importante para a confiabilidade na utilização do produto final. Se o banco de dados for impreciso e/ou cheio de erros, o resultado final será um mapa talvez extremamente colorido, capaz de impressionar, mas será um mapa sem significado, impróprio para uso técnico (SILVA, 1999).

Para utilizar as funções de SIG faz-se necessário um planejamento de etapas de trabalho juntamente com uma metodologia adequada para otimizar os procedimentos bem como manter um controle da qualidade dos resultados.

As funções básicas de SIG são divididas em consulta, reclassificação, análise de proximidade e contigüidade, modelos numéricos de terreno – MNT, operações algébricas não cumulativas e operações algébricas cumulativas (SILVA, 1999).

### 2.2.1 Processos de interpolação

Os interpoladores são um conjunto de procedimentos matemáticos inseridos nos SIGs e utilizados para estimar valores de uma variável em área interior aos pontos de amostragem disponíveis, permitindo representar em mapa, de forma contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente (ANDRIOTTI, 2003).

Alguns interpoladores como inverso do quadrado da distância; krigagem; curvatura mínima; vizinho mais próximo; regressão polinomial; e triangulação de Delaunay, estão inseridos no conjunto de ferramentas de análise de contigüidade de um SIG. Esta ferramenta tem como objetivo gerar superfícies contínuas a partir de dados de variação de altura, ou dados obtidos através de sensoriamento remoto, ou dados naturais da superfície terrestre, onde muitas vezes eles são obtidos como entidades pontuais. Para produzir superfícies contínuas a partir de dados pontuais, determinados tratamentos matemáticos (interpoladores) são necessários para a exportação de suas características não espaciais (CAMARA NETO, 1995).

Na presente pesquisa será utilizado, para análise dos dados e obtenção dos mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo analisados, o interpolador

geoestatístico de krigagem. Devido a isso o trabalho se restringirá apenas à explicar esta ferramenta.

### 2.2.2 Geoestatística

A oportunidade da aplicação de geoestatística em problemas com dados distribuídos espacialmente abriu a possibilidade de sua utilização em diferentes domínios das ciências naturais. Matheron<sup>9</sup>, citado por Landim e Sturaro (2002), define geoestatística como a aplicação do formalismo das funções aleatórias ao reconhecimento e à estimação de fenômenos naturais.

Andriotti (2003) afirma que os fenômenos apresentam uma aparente continuidade no espaço, sendo a geoestatística capaz de representá-los por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e matematicamente descrevem o fenômeno natural.

Segundo Lamparelli, Rocha e Borghi (2001), a geoestatística é um conjunto de técnicas que estimam valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada, tendo como ferramenta básica o método de interpolação denominado Krigagem.

De acordo com Landim e Sturaro (2002), a geoestatística calcula estimativas dentro de um fenômeno natural com distribuição no espaço e supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionadas, efetuando estimativas e/ou simulações de pontos intermediários não amostrados.

A geoestatística é amplamente empregada na análise de geo-campos (superfícies contínuas). É aplicada sobre grandezas distribuídas espacialmente, como tipo de solo, topografia e teor de minerais que correspondem, na prática, a dados temáticos, imagens e modelos numéricos de terreno (Goodchild, 1992).

---

<sup>9</sup> MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology, El Paso, v. 58, p. 1246-66, 1963.

Segundo EMBRAPA (2001), a variabilidade espacial na área agrônômica tem sido motivo de estudo há algum tempo. Smith<sup>10</sup> e Montgomery<sup>11</sup>, citados por Vieira (2000), já se preocupavam com os efeitos da variabilidade do solo em experimentos de rendimento de grãos. Entretanto, esta preocupação com a variabilidade espacial teve uma grande descontinuidade com a introdução da estatística clássica (Ficher<sup>12</sup>, citado por VIEIRA, 2000), ficando a variabilidade espacial entre as amostras em segundo plano.

Foi com Matheron<sup>13, 14</sup> (1963, 1971), citado pela EMBRAPA (2001), que a Geoestatística teve um grande impulso com o desenvolvimento da Teoria das Variáveis Regionalizadas.

Variável Regionalizada baseia-se em variáveis aleatórias, que consideram as posições relativas onde foram observados os diversos valores a serem introduzidos nos modelos (ANDRIOTTI, 2003).

“As vantagens reconhecidas da Geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição são o estudo da variabilidade espacial (a análise de um variograma é a única técnica disponível para medir a variabilidade espacial de uma variável regionalizada), a suavização (quanto maior a variabilidade da amostra, menos as observações individuais representam sua vizinhança imediata e mais elas são suavizadas, com maior incerteza associada); o desagrupamento (ou efeito de anular as concentrações localizadas de observações); a determinação da anisotropia (os comportamentos da variabilidade nas diferentes direções são considerados); a precisão (a krigagem fornece valores precisos sobre as áreas ou pontos a serem avaliados); e a incerteza (estimativas obtidas por meio da krigagem associam a margem de erro que acompanha a estimativa)” (ANDRIOTTI, 2003, pg.92).

---

<sup>10</sup> SMITH, L.H. Plot arrangement for variety experiment with com. Proc. Am. Soc. Agron., v.1, p. 84-89, 1910.

<sup>11</sup> MONTGOMERY, E.G. Experiments in wheat breeding: experimental error in the nursery and variation in nitrogen and yield. Washington, DC.: US. Dept. Agric..., 1913.

<sup>12</sup> FISCHER, R.A. Statistical methods and scientific inference. Edinburg: Oliver & Boyd, 1956.

<sup>13</sup> MATERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology, El Paso, v.58, p. 1246-66, 1963.

<sup>14</sup> \_\_\_\_\_. The theory of regionalized variables and its application. Les cahiers du centre de Morphologie Mathématique, Fas. 5 C.G. Fontainebleau, 1971.

No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas, duas são as ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem (Landim, 1997).

#### 2.2.2.1 Semivariograma

O semivariograma é a primeira ferramenta geoestatística e, de acordo com Landim (1997), mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras. Afirma ainda que a determinação do semivariograma é a etapa mais importante no estudo geoestatístico.

Andrriotti (2003) define o semivariograma como uma variância do erro que se comete ao estimar um valor desconhecido através de um ponto dado. É uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas – pelas covariâncias – que existem entre amostras espaçadas de sucessivos valores. É uma função crescente até um determinado valor conhecido como amplitude, mostrando quão díspares se tornam os valores quando a distância aumenta.

Landim (1997) explica que a diferença fundamental entre variograma e covariograma, é que o covariograma só está definido para as variáveis regionalizadas estacionárias e é limitado pela variância da função aleatória. A covariância geralmente diminui de valor com o aumento da distância entre os pontos de amostragem, ou seja, a correlação entre dois pontos analisados para a mesma variável diminui com o aumento da distância entre eles.

No semivariograma o valor de cada ponto está relacionado de algum modo com valores obtidos a partir de pontos situados a uma certa distância, sendo que a influência será maior quanto menor for a distância entre os pontos (RIBEIRO JUNIOR, 1995).

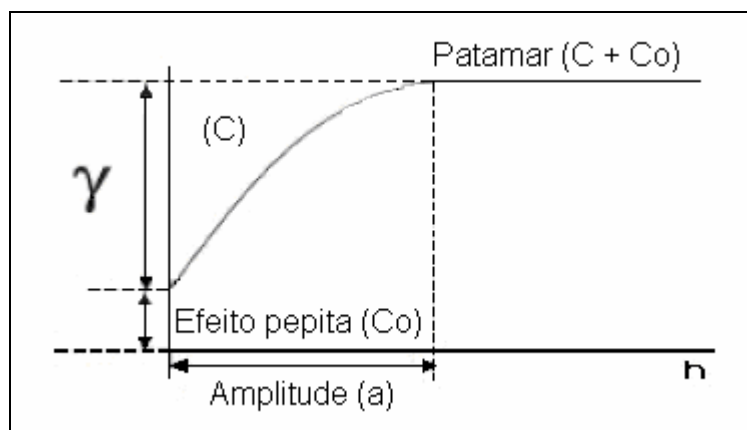
Landim (1997) afirma que os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram:

- o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, pois toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance fornece informações sobre o ponto;
- a anisotropia, quando os semivariogramas se mostram diferentes para diferentes direções de linhas de amostragem;
- a continuidade, pela forma do variograma. Essa situação é conhecida como efeito pepita (*nugget*) e é apresentada por  $C_0$ .

Landim e Sturaro (2002) descrevem as principais feições do semivariograma limitado, como (Figura 01):

- Alcance (a): é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, ou seja, a partir da qual a variação média entre duas observações não é mais função da distância entre elas, dando lugar à independência, sem correlações espaciais, representando a zona de influência;
- Patamar (C): é o valor de variância correspondente ao ponto em que o mesmo estabiliza; mostra a variabilidade máxima entre pares de valores, isto é a variância dos dados, conseqüentemente, covariância nula;
- Efeito pepita ( $C_0$ ): é o termo dado quando a descontinuidade à origem do variograma ocorre. Teoricamente esse valor deve ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto devem ter os mesmos valores; quando tal não ocorre, atribui-se essa diferença geralmente a erros de amostragem e/ou à variabilidade natural do fenômeno estudado (LANDIM, 1997; SANCHEZ et. al, 2005). Andriotti (2003) diz que a presença do efeito pepita pode ser alterada, simplesmente pela carência de pontos de observação.

FIGURA 01: PRINCIPAIS FEIÇÕES DO SEMIVARIOGRAMA



Fonte: LANDIM, 2002.

O ajuste do semivariograma deve ser feito a um modelo teórico, sendo este um processo que envolve várias tentativas e no qual a experiência pesa muito. Os modelos teóricos comumente verificados são: modelo esférico (de Matheron), modelo exponencial (de Formery), modelo gaussiano (parabólico), modelo linear, modelo logarítmico, entre outros (SOARES, 2000; EASTMAN, 2005).

Variáveis Regionalizadas possuem também características qualitativas estreitamente ligadas à estrutura do fenômeno natural expressas através do semivariograma que representam a localização, a continuidade e a anisotropia (quando o semivariograma mostra parâmetros diferentes para diferentes direções de amostragem).

Para determinar se a estatística clássica ou geoestatística deve ser utilizada, utiliza-se o semivariograma, que expressa a dependência espacial entre amostras. Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, pelo método denominado krigagem (VIEIRA, 2000).

A estrutura espacial dada pela análise do semivariograma não constitui o objetivo final da análise espacial, sendo necessário estimar os valores das variáveis em locais não amostrados visando ao conhecimento da distribuição espacial da variável em estudo. Desta forma, a análise da estrutura espacial é um passo fundamental mas não final, que precede a estimação (interpolação).

### 2.2.2.2 Krigagem

A krigagem é a segunda ferramenta geoestatística e Landim (1997), conceitua como um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma.

“É um método de estimação que se utiliza de um estimador linear não-viciado com mínima variância para interpolação do atributo medido em posições não amostradas” (LAMPARELLI, ROCHA e BORGHI, 2001, p. 82).

EMBRAPA (2001) define krigagem como métodos de interpolação que procuram minimizar o erro de estimação. O problema normalmente é o de estimar o valor de uma variável em locais não amostrados, a partir de valores de locais amostrados.

Soares (2000) menciona a krigagem como sendo um processo geostatístico introduzido por Matheron, sendo definido como uma estimativa de um atributo em um volume de suporte através da ponderação de todas as amostras disponíveis, na qual os pesos ponderadores são obtidos com a restrição de que seu somatório seja igual a 1 e a variância da estimativa seja mínima. O processo de curvatura gera uma superfície, a mais suave possível, e nem sempre seus dados são tomados como verdadeira grandeza. Por isso, este método não é considerado um interpolador exato.

Andriotti (2003) menciona que a vantagem primordial da krigagem é de que a ponderação das amostras elimina, em média, os erros de excesso. Este interpolador leva em consideração o número de amostras, a localização da amostra na área em estudo, as distâncias entre as amostras e a zona de influência e a continuidade espacial do fenômeno estudado.

Mcbratney<sup>15</sup>, citado por EMBRAPA (2001), afirma que krigagem apresenta melhores resultados de estimação para valores de variáveis em locais não amostrados do que as técnicas normalmente usadas para classificação de solo. Esta

---

<sup>15</sup> McBRATNEY, A.B. Geoestatistical soil survey. 1984. 250 p. Ph.D. Thesis – Department of Soil Science, University of Aberdeen.

melhoria é atribuída à maneira pela qual as variáveis regionalizadas interpretam a natureza da variação dos muitos atributos, como por exemplo do solo.

Segundo Soares (2000), os ponderadores do estimador de krigagem resumem fundamentalmente dois fatores:

- Quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será o seu peso no estimador;
- Quanto mais correlacionadas estiverem as amostras, maior o efeito de agrupamento ou redundância e menor será o seu peso individual na construção do estimador.

O termo krigagem abrange um conjunto de métodos, sendo os mais usuais os seguintes:

A krigagem simples, que é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área (há estacionariedade) e de valor muito semelhante à média conhecida (segunda ordem) da população. A média da população é utilizada para cada estimação local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimação (LANDIM; STURARO, 2002).

A krigagem ordinária, por sua vez, é utilizada quando a variável regionalizada é estacionária de primeira ordem (média desconhecida) e em casos onde a média é considerada flutuante por toda a área (LANDIM; STURARO, 2002; SANCHEZ, 2005); ou as flutuações locais da média são consideradas, limitando o domínio de sua estacionariedade para a vizinhança do local, sendo estas (krigagem simples e ordinária) utilizadas quando há estacionariedade nos dados (DRUCK et. al., 2004).

A krigagem ordinária é um interpolador exato, no sentido de que os valores interpolados (estimados) nos locais coincidentes dos locais amostrados, irão coincidir com os valores dos pontos amostrados. Além disso a variância da krigagem ordinária fornece informação importante sobre a confiabilidade dos valores interpolados (ANDRIOTTI, 2003).

O procedimento mais geral denominado krigagem universal é utilizada quando a média da amostra a ser estimada varia primeiro dentro da vizinhança e depois sobre toda a área de estudo considerada (CARVALHO; VIEIRA, 2001) é utilizada também quando existe uma tendência na área de estudo (DRUCK et. al.,



2004). Esta tendência ocorre sobre dados de fenômenos não-estacionários (com *drift*), ou seja, que não apresentam um comportamento que se pode considerar homogêneo dentro da área amostrada: por exemplo, os valores crescem de um modo sistemático numa dada direção ou os valores mais elevados concentram-se localmente num ponto ou área e decrescem de um modo radial em todas as direções (SOARES, 2000).

Existem ainda a krigagem intrínseca e krigagens não lineares, que incluem a lognormal, multigaussiana, indicativa, probabilística e disjuntiva.

A krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação, incluindo procedimentos estacionários (krigagem ordinária e simples), univariados e multivariados (co-krigagem) e não estacionários (krigagem universal) (DRUCK et. al., 2004).

Uma série de fatores influenciam no erro de estimativas por krigagem, dentro desses destacam-se (HOLZBERG, 2001):

- Número de amostras na vizinhança do ponto de estimativa: quanto mais amostras próximas ao ponto, menor será o erro da estimativa;
- Proximidade das amostras ao ponto de estimativa: quanto mais próximas do ponto estiverem as amostras, menor será o erro da estimativa;
- Configuração espacial das amostras: amostras uniformemente distribuídas na vizinhança do ponto devem proporcionar menor erro se comparadas à amostras concentradas em uma determinada região;
- Natureza do fenômeno estudado: os fenômenos que apresentam suave variação espacial possibilitam estimativas mais confiáveis do que os que apresentam uma grande variação espacial.

As medidas de incertezas utilizadas em geoestatística se apresentam de três maneiras distintas: índice de incerteza, intervalos de confiança e distribuição de probabilidades (HOLZBERG, 2001).

Por fim, a geoestatística é utilizada para descrever e modelar padrões espaciais (semivariograma), para prever valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados e para otimizar malhas de amostragem.

Mas para avaliar os resultados obtidos da krigagem, diferentes autores utilizaram metodologias distintas as quais serão apresentadas a seguir.

Novaes Filho (2007) analisou e ajustou seus modelos de semivariograma considerando o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a menor soma de quadrado de resíduos (RSS), através de teste de validação cruzada, permitindo comparar os resultados observados e estimados.

Junior (1995) utilizou o teste de validação cruzada para avaliar se seus resultados foram coerentes e verificar se o fenômeno foi satisfatoriamente modelado, sendo possível reproduzir com boa aproximação, informações da amostra. Relata ainda que a validação cruzada não está avaliando simplesmente o modelo escolhido para o semivariograma. Este inclui a decisão de estacionaridade, os estimadores utilizados, o tratamento dos dados atípicos, o modelo de semivariograma adotado e a decisão relativa à anisotropia.

Ortiz (2003) utilizou para validação dos modelos ajustados de semivariograma, a validação cruzada. Entretanto, para validação do ajuste do semivariograma de alguns fenômenos utilizou a regressão linear simples entre os valores observados e os estimados, analisando os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Vieira (2000) afirma que a qualidade da estimativa por krigagem pode ser medida pelo julgamento dos parâmetros de coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $R^2$ ), calculados através de regressão linear entre os valores observados e estimados.

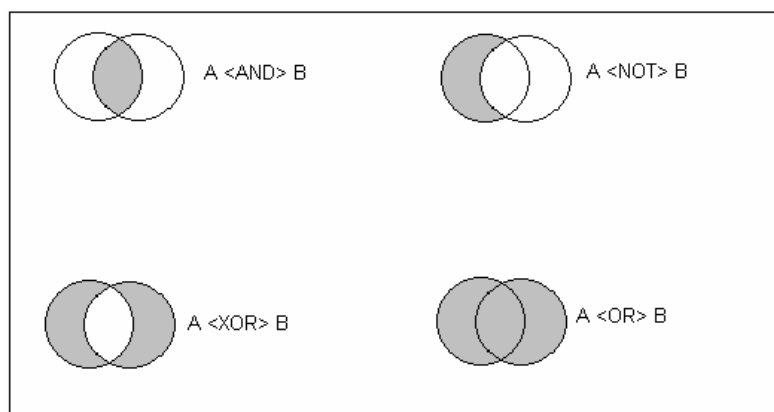
### 2.2.3 Análise booleana

Segundo Silva (1999), a análise booleana está inserida nas análises algébricas não-cumulativas, também chamadas de análises lógicas, e compreendem a análise booleana, a rotina fuzzy e a probabilidade bayesiana.

A análise booleana foi desenvolvida em 1854 pelo matemático inglês George Boole. Esta lógica baseia-se em estabelecer limites determinados a partir de informações consideradas falsas, atributo 0 (zero), e verdadeiras, atributo 1 (um).

Para alcançar estes objetivos utiliza-se dos seguintes operadores <AND>, <XOR>, <NOT> e <OR>. O diagrama de Venn apresentado na Figura 2 esclarece de forma gráfica a utilização dos operadores.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE VENN E OPERADORES



Fonte: Silva, 1999.

Analisando a Figura 2, o operador <AND> é utilizado quando na sobreposição dos A e B de uma mesma área de estudo, serão consideradas verdadeiras aquelas áreas que compõem o mesmo espaço georreferenciado. Este operador pode ser utilizado para gerar um mapa de solos que apresente a simultaneidade de fatores positivos para se determinar a classe de solo.

O operador <XOR> é utilizado, quando na sobreposição dos mapas A e B, o atributo verdadeiro é aquele referente às áreas que não ocupem a mesma posição georreferenciada.

O operador <NOT> é utilizado, quando na sobreposição dos mapas A e B, são consideradas falsas as áreas que ocupem a mesma posição georreferenciada, mais as áreas de um dos mapas que não ocupem a mesma posição.

O operador <OR> é utilizado, quando na sobreposição dos mapas A e B, serão consideradas verdadeiras as áreas que ocupem ou não a mesma posição georreferenciada.

## 2.3 ALGUMAS APLICAÇÕES NO ESTUDO DE SOLOS

A intenção deste capítulo é verificar como a geoestatística está sendo aplicada no estudo de solos e qual o estado da arte de sua aplicação.

Ribeiro Junior (1995) aplica a geoestatística sobre dados de umidade e densidade de solos e mostra a contribuição potencial na compreensão dos fenômenos e de estrutura de dependência espacial.

Percebe-se que estes trabalhos utilizaram no processo de krigagem os modelos de semivariograma que apresentaram a melhor correlação entre o observado e o estimado, bem como os menores resíduos.

Valencia, Meirelles e Fucks (2001) aplicaram métodos geoestatísticos para espacializar dados de nutrientes do solo e a incerteza dos produtos gerados. Aplicou-se sobre uma área de plantio direto de 13 há, onde foram coletadas as amostras em grades de 5, 10, 20 e 40m que permitiu detectar a variabilidade espacial em distâncias pequenas e a presença de anisotropia. Confirmaram também a eficiência destes métodos na estimação espacial dos nutrientes do solo. Por fim, compararam os mapas de produtividade com os mapas de variabilidade de nutrientes, o que permitiu entender as causas da baixa produtividade.

Fonseca et al. (2002) utilizaram a interpolação por krigagem ordinária sobre dados físicos de solos, tomando como base um mapa existente. Constataram que a krigagem apresenta melhores resultados e melhor visualização da espacialização dos mesmos quando comparada com operações de fatiamento.

Vicente et al. (2003) avaliaram e compararam as técnicas de krigagem indicativa e krigagem ordinária isotrópica e anisotrópica sobre dados de interesse para agricultura de precisão. Constataram que a krigagem indicativa permite um elevado grau de automação, minimizando a participação do analista. Desta maneira concluíram que esta é a técnica mais apropriada para trabalhos nesta área.

Imai et al. (2004) avaliaram e compararam os mesmos métodos de Vicente et al. (2003), para detectar, levantar e mapear ervas daninhas em culturas de soja, e observaram melhor resultado na krigagem indicativa, comparada à krigagem ordinária, por permitir a análise das incertezas.

Sanchez (2005) aplicou a geoestatística sobre dados físicos-químicos de solos e dados da produtividade de café em duas superfícies geomórficas, estando a primeira localizada em superfície plana e a outra em uma encosta. Em ambas as superfícies coletou amostras de solo utilizando sistema de malha de mesma densidade (50 m x 50m).

Estes dados foram lançados ao semivariograma e constatou-se que, para os dados de argila, matéria orgânica, CTC, saturação por bases e pH da segunda superfície, apresentaram efeito pepita puro, ou seja, ausência de dependência espacial. Para os demais atributos ele classifica os diferentes graus de dependência espacial em fraca, média e forte, segundo escala de Cambardella<sup>16</sup> et al., citado por Sanchez (2005). O autor ressalta que o modelo esférico é o mais adaptado para descrever o semivariograma de propriedades de solos e de plantas.

Ainda o mesmo autor menciona que mapas de krigagem podem fornecer informações que permitem entender melhor o padrão de distribuição espacial e definir zonas de manejo. Menciona ainda que, através da espacialização destas variáveis, podem auxiliar na delimitação de unidades de mapeamento.

O efeito pepita puro em alguns atributos do solo vai ao encontro da afirmação de Vieira (2000), que diz que nesta situação não se aplica a geoestatística, mas sim a estatística convencional. No entanto, aplica a geoestatística sobre os outros conjuntos de dados do solo baseado na escala de Cambardella<sup>17</sup> et al., citado por Sanchez, (2005), que define três diferentes graus de dependência espacial.

Machado et al. (2004), avaliando a variabilidade espacial da condutividade elétrica de um Latossolo-Vermelho em sistema de plantio direto, relacionaram os valores de condutividade elétrica com a variação dos teores de argila. Foram coletadas amostras por meio de grades de espaçamentos regulares de 40 m, 20 m, 10 m e 5 m. Os valores interpolados de condutividade elétrica e dos teores de argila foram comparados através de ajuste paramétrico não-linear. Verificou-se que o mapa de condutividade elétrica reflete a variação nos teores de argila, podendo ser utilizado para a delimitação das zonas de manejo.

---

<sup>16</sup> CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-11, 1994.

<sup>17</sup> Id.

Quanto aos trabalhos que utilizaram o sistema de malha para coleta de amostras e posteriormente aplicada a geoestatística, todos mostraram resultados satisfatórios, sem recomendar ou indicar espaçamento ideal a ser utilizado.

Percebe-se que devido ao fato destes trabalhos estudarem solos, buscam entender melhor estas correlações com a paisagem, onde Vieira (2000) defende que esta deve ser uma rotina nas análises para permitir maior exatidão científica nas recomendações.

Bishop e Mc Bratney (2000) compararam vários métodos para mapear a troca catiônica do solo, usando diferentes combinações de informações secundárias. Os métodos utilizados foram: a análise estatística (regressão linear múltipla, árvore de regressão, modelo cumulativo generalizado), geoestatística (krigagem ordinária) e técnicas híbridas (regressão-krigeagem, krigagem com drift externo). As informações secundárias utilizadas foram atributos do terreno, cor do solo exposto em fotografias aéreas e imagem LANDSAT TM e dados de condutividade elétrica do solo. Os resultados apontaram como melhores métodos a krigagem com drift externo, a regressão linear múltipla e o modelo cumulativo generalizado, utilizando a combinação dos dados da condutividade elétrica aparente com a cor do solo exposto em fotografias aéreas.

Hengl, Heuvelink e Stein (2003), utilizaram estrutura metodológica baseada na regressão krigagem sendo descrita e comparada com a krigagem ordinária e regressão linear, para prever espacialmente as variáveis do solo. A estrutura foi testada utilizando 135 observações de perfis, dividindo em 100 interpolações e 35 conjuntos de variações. Três variáveis: matéria orgânica, pH no topo do solo e espessura da camada superficial do solos, foram preditos em seis unidades de relevo e nove unidades de solo. A eficiência da predição foi avaliada usando o erro médio e quadrado médio da raiz para determinar pontos de validação. Os resultados mostram que a estrutura proposta melhora a eficiência das predições. Além disso, assegurou a normalidade dos resíduos e reforçou valores da predição para estar dentro da escala física de uma variável. Esta estrutura pode adotar variáveis contínuas e categóricas do solos de maneira automatizado ou semi-automatizada.

Juan, Cheng e Lee (2004) utilizaram a krigagem para estimar e delimitar concentrações de metais pesados no solo. Foram calculadas as incertezas e

determinada a probabilidade de contaminação do solos, sendo representadas através de um mapa. Os resultados da incerteza sobre o cobre foram utilizados para delinear áreas de suspeita de contaminação. A confiança nesta informação facilita o processo de tomada de decisões para a recuperação de áreas contaminadas.

Meul e Meirvenne (2003) avaliaram quatro métodos geoestatísticos de interpolação a fim de esclarecer tipos diferentes de mobilidade no índice do silte da porção superficial do solo: krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem simples e cokrigagem ordinária. Dois tipos de circunstâncias móveis foram identificados dentro da área do estudo: (1) uma tendência em grande escala no índice do silte e na elevação, (2) uma flutuação local muito forte em torno de um valor médio. Conseqüentemente, as técnicas diferentes foram aplicadas em partes diferentes dentro da área do estudo: a tendência global foi explicada melhor pela co-krigagem ordinária e a krigagem universal podendo melhorar o esclarecimento da não estacionaridade local. Após ter combinado os resultados dos dois métodos da predição, verificou-se que o estimador total do índice do silte era mais preciso do que quando o único método foi usado sobre a área inteira do estudo.

Todos concluíram que a geoestatística é capaz de representar a variabilidade contínua de atributos físicos, químicos e morfológicos de solos. No entanto alguns autores indicam que a melhor krigagem é aquela que necessita menos do operador para a tomada de decisões, enquanto outros defendem que os melhores são aqueles que apresentam maior coeficiente de determinação, menor resíduo, ou menor erro médio e quadrado médio residual. Esta situação mostra a possibilidade destes atributos, quando espacializados, poderem auxiliar a delimitação de unidades de mapeamento.

McBratney, Mendonça Santos e Minasny (2003), discutiram vários métodos que puderam ser comparados ou poderiam ser, relacionados quantitativamente a propriedades do solo, classes de solo e a seus locais de ocorrência no meio ambiente. Entre estes incluem modelos lineares generalizados, classificação através da árvore de regressão, redes neurais, sistemas fuzzy e geoestatística. Através deste comparativo propuseram uma metodologia para produção de mapas digitais de solos, que consiste-se basicamente em: definição dos atributos de interesse; sistema de amostragem para obter os locais de amostras; localização com GPS e

análise de laboratório a fim de obter a classe de solo e criação do mapa digital. Ao final afirmam que os softwares hardwares, o conhecimento e a tecnologia são claramente possíveis de avaliar o recurso solo e ressaltam ainda perguntas chave que ficam abertas, como: qual método de amostragem para criação de mapas digitais de solos; qual o método de análise dos dados o mais apropriado; Avaliação da qualidade do mapa digital de solos.

Florence Carre e Girard (2002), realizaram estudo com a finalidade de apresentar uma metodologia para traçar tipos do solo ilustrado por observações típicas na base de dados do solo, neste caso da área de La Rochelle no Costa Mid-Atlantic francesa. A primeira etapa consistiu-se em desenvolver um tipo local de classificação de solo. A segunda etapa, foi envolver a equação do solo-ambiente para cada tipo de solo por distâncias observadas em uma grade de 20 m, pela regressão linear múltipla. A terceira etapa é a predição das camadas do solos por krigagem. A quarta etapa envolve a validação com uma série de dados independente do solo permitindo a descoberta da natureza dos erros reais da predição. Trinta e oito por cento dos locais foram validados de forma equivocada e 23% foram preditos de maneira errada pelo método. Ao final concluem que por o método ocorrer em etapas, os erros podem ser localizados; o método é fácil e rápido para ser processado e que os resultados dependem da amostragem do solos e das variáveis do ambiente escolhidas.

Czajkowski e Landim (1999) aplicaram a krigagem ordinária sobre resultados de análises físicas e químicas (394 pontos em uma área de 250.000 ha) do levantamento pedológico semidetalhado de Guaira, SP, com a intenção de determinar a eficiência do método geoestatístico em pedologia, buscando adicionar um enfoque quantitativo espacial aos métodos convencionais utilizados em levantamentos de solos. Concluíram que não foi possível utilizar a geoestatística devido à presença de efeito pepita puro e acentuado. Tal fato revela que a amostragem deve ser adensada ou a área estudada deve ser menor.

Novaes Filho (2007) mapeou a distribuição pedológica das classes de solos por meio de dependência espacial dos atributos gradiente textural e cor do horizonte B, identificando os limites entre classes de solo. Foram analisados e ajustados modelos de semivariograma para as variáveis gradiente e cor, considerando o maior



$R^2$  (coeficiente de determinação) e o menor RSS (soma de quadrado de resíduos) por meio através do teste de validação cruzada, que permitiu comparar os resultados observados e estimados.

Realizada a krigagem e gerados os mapas de distribuição espacial das duas variáveis, os mesmos foram sobrepostos para gerar um mapa com a distribuição de áreas distintas referentes ao acúmulo de argila em profundidade e à cor do solo, que permitiu a classificação destes no segundo nível categórico. O mapa gerado apresentou as seguintes classes: horizonte B com gradiente textural de cor amarela, horizonte B com gradiente textural de cor vermelho-amarela, horizonte B sem gradiente textural de cor amarela, horizonte B sem gradiente textural de cor vermelho-amarela e horizonte B sem gradiente textural de cor vermelha. Este trabalho conseguiu mapear solos seguindo os critérios de classificação, porém não utilizando o sistema taxonômico da EMBRAPA (1999).

As características analisadas em todos estes trabalhos compõem em parte o grupo de dados requeridos para a distinção de classes de solos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

Desta forma estes trabalhos sustentam a hipótese desta pesquisa de que a geoestatística aplicada sobre os atributos do solo (Ribeiro Junior, 1995; VALENCIA, MEIRELLES e FUCKS, 2001; FONSECA et al., 2002; VICENTE et al., 2003; IMAI et al. 2004; SANCHEZ, 2005; MACHADO et al., 2004; BISHOP e MC BRATNEY, 2000; HENGL, HEUVELINK e STEIN, 2003; JUAN, CHENG e LEE, 2004; MEUL e MEIRVENNE, 2003; CZAJKOWSKI e LANDIM, 1999; NOVAES FILHO, 2007), trabalhados em conjunto com os critérios e parâmetros de classificação (EMBRAPA, 1999), através da análise booleana (SILVA, 1999), pode contribuir para o estabelecimento de uma metodologia de levantamento de solo mais confiável, mais rápida, mais barata e menos subjetiva, tendo em vista que todos os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios e em alguns casos os resultados superaram as expectativas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

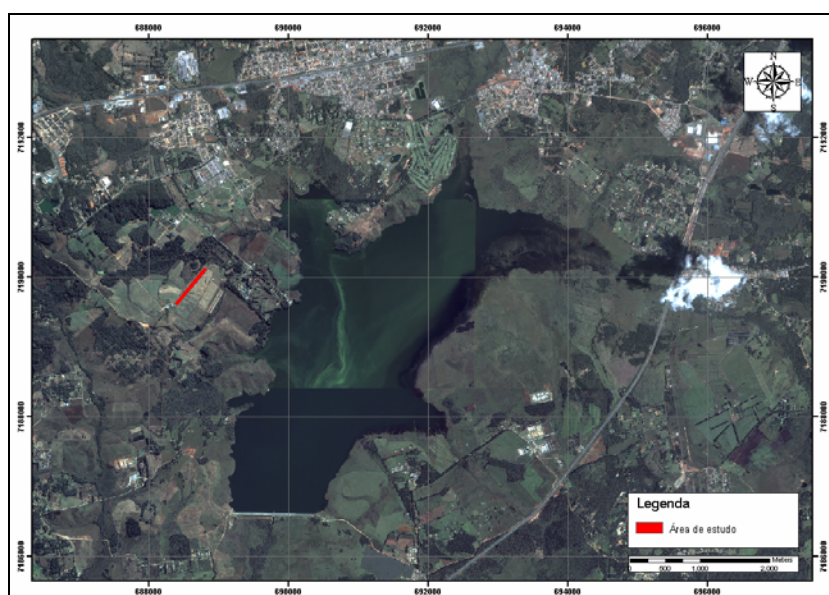
Primeiramente é apresentada uma caracterização geral da região onde estão inseridas a sua localização geográfica e as características do meio físico da região. Posteriormente serão apresentados o material e a metodologia utilizada para processamento dos dados e geração do mapa final de solos.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

##### 3.1.1 Localização

A área de estudo ocupa uma porção de 12,88 ha do Centro de Estações Experimentais do Cangüiri da UFPR, localizado no Primeiro Planalto Paranaense, na região metropolitana de Curitiba (PR), município de Pinhais (PR). Está situada entre as seguintes coordenadas, no sistema Universal Transverso de Mercator – UTM, *Datum* SAD 69, fuso 22 sul, meridiano central 51° 00' 00" W: 686.000m , 690.000m, 7.192.000m e 7.188.000m, como mostra a Figura 03.

FIGURA 03 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



### 3.1.2 Geologia

De acordo com a folha geológica de Piraquara, a área em estudo situa-se sobre a Formação Guabirotuba. Bigarella e Salamuni<sup>18</sup>, citados por Salamuni (1998) deram esta denominação para os sedimentos do Quaternário antigo localizados na Bacia de Curitiba. Os materiais compostos por estes sedimentos foram os argilitos, seguindo-se os arcósios e depósitos rudáceos, além de pequenos horizontes de caliche. Estas litologias foram descritas como materiais inconsolidados ou quando muito endurecidos por soluções de carbonato de cálcio. Esta sedimentação é típica de leques aluviais e depósitos fluviais, ou possivelmente de *playa*, com espessuras não superiores a 60m, com altitudes de ocorrência variando de 870 a 940m (dentro da bacia sedimentar de Curitiba) e apresentando coloração cinza-esverdeada.

Segundo Felipe et al. (1994), a área apresenta as seguintes unidades geológicas:

Sedimentos recentes:

- QHi – ALUVIÕES ATUAIS – Sedimentos areno-sílico argiloso depositado em ambiente fluvial. Camadas decimétricas a métricas de cascalhos arenosos e areiais de granulometria média a grossa, com seixos subangulosos a subarredondados de quartzo, intercalados com argila plástica de cor cinza.

Formação Guabirotuba:

- QPga – Sedimentos argilosos de cor cinza a cinza-esverdeado, com grânulos de quartzo e feldspato, intercalados com lentes centimétricas a métricas de arcósio, granulometria média a grossa. Nos arcósios, estratificação cruzada tangencial na base e estruturas de corte e preenchimento;
- QPgb – Sedimentos argilosos de cor cinza a cinza esverdeado, com grânulos de quartzo e feldspato. Ocorrem raras intercalações de lentes de arcósios. Estes sedimentos são interpretados como de deposição em ambiente de leque. Localmente, nas zonas basais, foram encontrados sedimentos arenosos, com estratificação cruzada tangencial na base, interpretados como de fácies de leque anastomosado.

---

<sup>18</sup> BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. Boletim da UFPR. Geologia, Curitiba, n.7, p. 1-164, 1962.

### 3.1.3 Relevo

De acordo com Maack (1968), a área está situada no Primeiro Planalto Paranaense, limitado a Leste pela Serra do Mar e a Oeste pela escarpa devoniana de São Luis do Purunã, com altitudes variando de 750 m a 900 m, sendo bastante homogênea, formando uma paisagem ondulada. É compreendido por porções bem distintas quanto aos aspectos morfológicos: a bacia sedimentar de Curitiba, onde a área está localizada, pelos morrotes do embasamento arrasados pela erosão e pelos sedimentos fluviais recentes.

Conforme Salamuni (1998), a bacia sedimentar de Curitiba está fortemente condicionada pela morfotectônica e os fatores climáticos são responsáveis pela modelagem geomórfica atual.

O rio Iguaçu é o principal canal da bacia sedimentar e, junto com seus formadores, está dissecando a bacia e ao mesmo tempo depositando sedimentos no vale de inundação.

A bacia de Curitiba apresenta um relevo plano contendo sistemas de planície ou terrenos aluviais (fundo de vale), sistema de colinas (unidades de topo alongado – Formação Guabirota e embasamento), sistema de colinas (unidades de topo plano – embasamento e Formação Guabirota), sistema de montanhas marginais (Serra do Mar) e o sistema de morros de topografia mais ou menos íngremes (Grupo Açungui).

Conforme Felipe et al. (1994), a área estudada apresenta porções com declividade, em ordem decrescente de ocorrência: de 2,5 a 5%; de 0 a 2,5%; de 5 a 10% e uma pequena porção com declividade variando de 10 a 20%, o que caracteriza a presença de relevos planos a ondulados.

### 3.1.4 Solos

Conforme EMBRAPA (1984), em levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná, ocorrem na região onde a área de estudo está inserida as seguintes unidades de mapeamento:

- CHa4 – CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico, álico A proeminente textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado substrato sedimentos pleistocênicos;
- CHa5 – Associação CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico, álico A proeminente substrato sedimentos pleistocênicos + ALISSOLO CRÔMICO húmico típico ambos textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado;
- LBw1 – LATOSSOLO BRUNO Ácrico típico A proeminente textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado;
- LBw2 – Associação LATOSSOLO BRUNO Distrofíco típico + CAMBISSOLO HÁLICO Tb distrofíco típico, álico substrato sedimentos pleistocênicos ambos A proeminente textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado;
- HY2 – ORGANOSSOLO MÉSICO sáprico típico fase campo subtropical de várzea relevo plano.

### 3.1.5 Vegetação

Segundo Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná realizado pela EMBRAPA (1984), a cobertura original da região onde a área de estudo está inserida é caracterizada como fase Floresta Subtropical Perenifólia e Campos Subtropicais. A Floresta Subtropical Perenifólia, em geral apresenta três estratos. O superior constituído por araucária, imbuia, cedro, canela e outras espécies de grande porte; o médio por podocarpus, pimenteira, guaramirim, erva-mate, guabiroba, bracatinga e outras; e o inferior por ervas, arbustos e gramíneas sendo grande a incidência de capim-de-cachorro, sapé, uvarana e samambaia.

Conforme Maack (1968), “os Campos Subtropicais caracterizam-se por apresentarem gramíneas, cobrindo grandes áreas, mais ou menos contínuas e apenas interrompidas por pequenos bosques ou capões, próximos às nascentes, ou na transição do campo para a mata. Árvores e arbustos ocorrem em faixas próximas aos cursos de água, em meio aos campos, formando as pseudo matas de galeria”.

### 3.1.6 Clima

Conforme Maack (1968), o clima predominante na região, de acordo com a classificação de KOEPPEN, é o Cfb, que se refere a um clima tropical-subtropical sempre úmido, clima pluvial quente-temperado, com temperaturas no mês mais quente inferiores a 22°C, onze meses com temperaturas superiores a 10°C, mais de cinco geadas por ano e raramente neva.

Ainda segundo Maack (1968), os ventos predominantes portadores de chuvas são de NW com 20,9% e NE com 18,8%. Os ventos de bom tempo são o SW, S e SE, com frequência de 30,6%, 7,9% de ventos W, 3% de ventos E e 3,3% de N. Ocasionalmente devido à proximidade com a Serra do Mar, os ventos de S e SE desencadeiam as chuvas orográficas.

### 3.1.7 Hidrografia

As nascentes, bem como a rede hidrográfica que compõe a área de estudo, desaguam no rio Cangüiri, sendo este um dos afluentes do rio Irai, um importante rio para a captação de água para a população de Curitiba e região metropolitana. Por sua vez, o Rio Irai é um dos afluentes do rio Iguaçu, o maior rio à cruzar o estado do Paraná. A rede de drenagem existente na área faz parte da porção da bacia do Iguaçu conhecida como Altíssimo Iguaçu, uma área de extrema importância ambiental e que por sua vez deve ser preservada.

## 3.2 MATERIAL

### 3.2.1 Material de campo

- Trado mecânico;
- Trator;
- Aparelho receptor GPS;
- Tubos de PVC de 100 mm x 110 cm;
- Sacos plásticos e etiquetas;
- Máquina fotográfica;
- Estação total;
- Estacas de 50x2x2 cm;
- Trena;
- Balizas.

### 3.2.2 Softwares e Equipamentos

- IDRISI 32 Release 2.0 Sistema de Tratamento de Imagens e Sistema Geográfico de Informações, desenvolvido pela Clark University – Massachussets;
- Arc Gis 8.1 Sistema de Informações Geográficas, desenvolvido pela ESRI;
- Munsell Conversion Software versão 7.0.4 free;
- Um computador Pentium IV, 2,6GHz, 1GHz de RAM, 80 Gb

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 Coleta das Amostras

A coleta de amostras seguiu o sistema de malha preconizado pela EMBRAPA (1995) para levantamento de solos detalhados, com espaçamento de 30 m x 30 m. Este sistema foi utilizado em diversos trabalhos semelhantes, tais como: Sanches (2005), Valencia, Meirelles e Fucks (2001) e Machado et al. (2004).

Foram sorteados mais 10 % do numero total de pontos, de forma aleatória no interior desta malha, visando ao adensamento da amostragem com a finalidade de evitar problemas, como efeito pepita acentuado e a não correlação entre as amostras, como identificados por Czajkowski e Landim (1999).

Foi utilizado para a coleta de solo um trado mecânico, equipamento este que necessita ser acoplado a um trator para o seu funcionamento. No interior deste equipamento é colocado um tubo de PVC de 100 mm com 1,10 m de comprimento e à medida que o equipamento penetra no solo, o tubo que está no interior do trado é preenchido com solo, conforme mostram as fotografias 01, 02, 03 e 04.

FOTO 1 – TRADO MECÂNICO ACOPLADO AO TRATOR





FOTO 2 – ENCAIXE DO TUBO DE PVC NO EQUIPAMENTO



FOTO 3 – TUBO DE PVC INSTALADO E COM A PONTEIRA ACOPLADA, PRONTO PARA A COLETA



FOTO 4 – TUBO DE PVC PREENCHIDO COM AMOSTRA DE SOLO



### 3.3.2. Descrição Morfológica

Após a coleta, os tubos foram abertos e realizada a descrição morfológica (Foto 05), conforme especificado por Lemos e Santos(1996). Foram selecionados os atributos morfológicos para classificação (cor e espessura).

FOTO 5 – TUBO ABERTO PARA IDENTIFICAÇÃO E COLETA DE AMOSTRA DOS HORIZONTES A E B.



Foram coletadas amostras dos horizontes superficial e sub-superficial e estas foram ensacadas separadamente, para serem submetidas às análises granulométrica e química.

### 3.3.3 Análise do solo

As análises granulométricas (textura) e química do solo (pH em H<sub>2</sub>O e em KCl, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, P, K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> + Al<sup>+3</sup> e Carbono) foram realizadas conforme metodologia citada por EMBRAPA (1997).

### 3.3.4 Manipulação dos dados em SIG

Realizadas as análises de solo e obtidos os resultados, estes foram tabulados e inseridos em um banco de dados de acordo com o nome, a localização e o horizonte correspondente de cada amostra.

Os dados de matiz do horizonte B foram convertidos para o sistema de cores YHS (MUNSELL CONVERSION SOFTWARE), identificados os intervalos correspondentes para cada matiz das carta de cores.

Com base nestas informações e com a utilização do *software* IDRISI 3.2, gerou-se um layer de pontos do tipo vetor para os pontos de coleta.

Através do banco de dados geraram-se *layers* de pontos com valores correspondentes a cada um dos atributos estudados.

#### 3.3.4.1 Critérios geoestatísticos

Para a realização das interpolações por krigagem utilizou-se o módulo geoestatístico disponível no IDRISI 3.2. Este *software* possui três etapas distintas no processo de interpolação, onde o operador deve ajustar manualmente todas as opções disponíveis em cada uma das etapas.

As etapas um e dois do IDRISI constituem a primeira ferramenta geoestatística (LANDIM, 1997) que é o ajuste do grau de dependência espacial (1ª etapa) e a determinação do tipo de semivariograma (2ª etapa).

A primeira etapa consistiu no ajuste do modelo experimental ou modelo de dependência espacial, como ilustra a figura 04.

A segunda etapa consistia-se em ajustar o modelo teórico ao modelo experimental (Figura 05).

FIGURA 04 – INTERFACE DO SOFTWARE IDRISI 32 PARA AJUSTE DO GRAU DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL (MODELO EXPERIMENTAL)

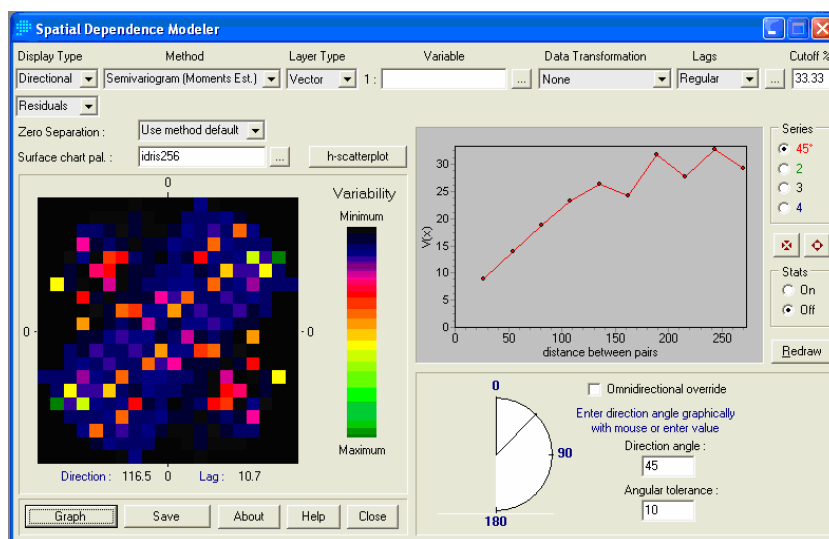
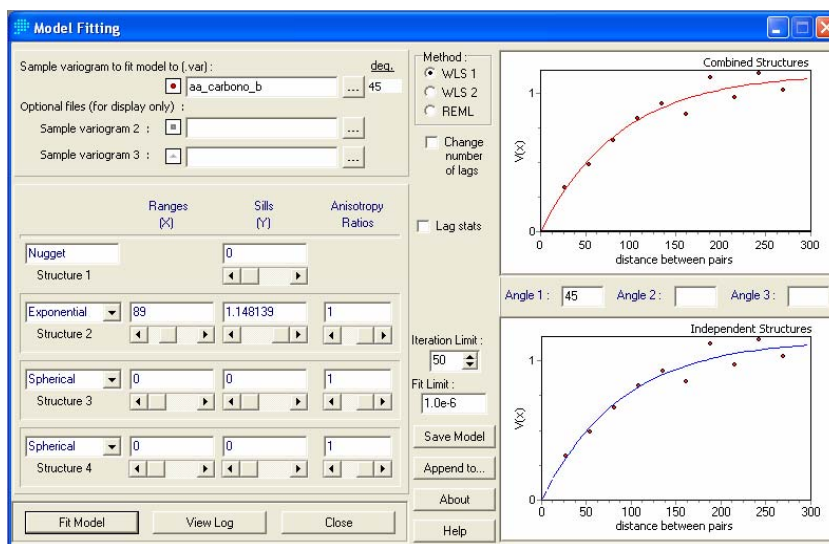


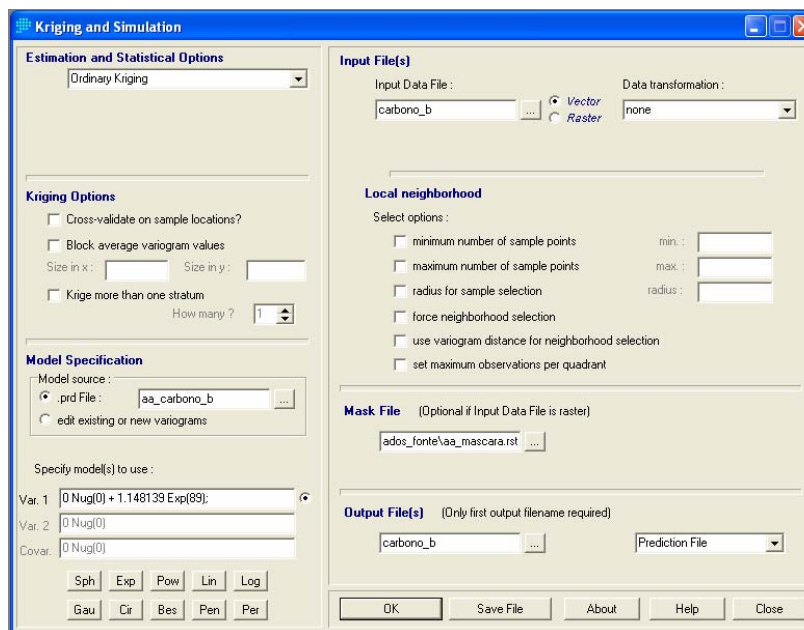
FIGURA 05 – INTERFACE DO SOFTWARE IDRISI 3.2 PARA O AJUSTE DO MODELO TEÓRICO AO EXPERIMENTAL



O terceiro e último passo é o ajuste dos parâmetros para a realização da krigagem (figura 06). Segunda ferramenta geoestatística (LANDIM, 1997).

As três etapas geoestatísticas apresentadas são caracterizadas por processo de exaustivas tentativas e erros para o ajuste dos modelos (SOARES, 2000; EASTMAN, 2005).

FIGURA 06 – INTERFACE PARA AJUSTE DOS PARÂMETROS PARA KRIGAGEM



### 3.3.4.2 Tomada de decisões e lógica Booleana

Com a utilização da análise Booleana, disponível no *software* IDRISI, as imagens geradas a partir da krigagem serviram de base para aplicação dos parâmetros e critérios descritos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), para a distinção das unidades taxonômicas no 4<sup>o</sup> (quarto) nível categórico.

Identificadas as unidades taxonômicas, estas foram vetorizadas e exportadas para o *software* ArcGis 8.1, onde foram submetidas aos critérios cartográficos estabelecidos segundo EMBRAPA (1996) para levantamentos detalhados. Desta forma optou-se pela escala de publicação de 1:10.000, por ser a mesma escala do levantamento de solos do Centro de Estações Experimentais do Cangüiri (ROCHA, 1998), tendo como área mínima mapeável 0,4 ha.

Nas unidades de mapeamento identificadas ao 3<sup>o</sup> nível categórico, quando denominadas ao 4<sup>o</sup> nível categórico, utilizaram-se as unidades taxonômicas predominantes em cada unidade de mapeamento, adicionados os atributos classe textural, classe de declive e tipo de horizonte A.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para facilitar o entendimento este capítulos foram arranjados em três compartimentos distintos e interligados. Inicialmente fez-se uma análise dos procedimentos geoestatísticos para a espacialização dos atributos do solo; posteriormente são avaliados os resultados das interpolações por krigagens, tendo como base os pontos determinados e estimados; e finalmente aplicou-se os critérios de classificação de solos e cartográficos para a geração do mapa final de solos.

### 4.1 INTERPOLAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO.

Neste tópico serão apresentados resultados obtidos da interpolação dos atributos do solo. Para isso foram utilizadas o semivariograma e o interpolador de krigagem, ferramentas estas recomendadas por Landim (1997).

#### 4.1.1. Ajuste do grau de dependência espacial (modelo experimental)

O ajuste do modelo experimental, também conhecido como modelo de dependência espacial, foi a primeira etapa.

As Tabelas 01 e 02 mostram os parâmetros alcançados, após várias e exaustivas tentativas, para o melhor ajuste do modelo experimental dos atributos do solo dos horizontes A e B.

Os resultados obtidos para os dados do horizonte A (Tabela 01), observa-se que apenas cinco atributos, sendo três químicos e dois morfológicos, não necessitaram de transformação. Para todos os atributos foram utilizados 10 lags regulares, com exceção do fósforo, com intervalos variados entre 16 m e 27m. Nove atributos resultaram em modelos anisotrópicos, com as direções variando de 0° a 45° e a tolerância angular variando de 16° a 42°.

TABELA 01 – PARÂMETROS ALCANÇADOS PARA OS AJUSTES DOS MODELOS EXPERIMENTAIS REFERENTES AOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE A

| Elemento               | Transformação | Lag<br>n <sup>o</sup> / dist. | Cutoff<br>(%) | Isotrópico | Anisotrópico<br>direção /<br>tolerância angular |
|------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|------------|---|
| Argila                 | Padrão        | 10 / 23                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Silte                  | Padrão        | 10 / 19                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Areia fina             | Padrão        | 10 / 20                       | 33,33         | não        | 0 / 16  |
| Areia grossa           | Padrão        | 10 / 21                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Alumínio               | ----          | 10 / 16                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Calcio                 | Padrão        | 10 / 20                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Carbono                | Padrão        | 10 / 27                       | 33,33         | não        | 18 / 42   |
| Fósforo                | Padrão        | 15 / 19                       | 33,33         | não        | 0 / 22,5  |
| Hidrogênio             | Padrão        | 10 / 16                       | 33,33         | não        | 18 / 30   |
| Magnésio               | Padrão        | 10 / 16                       | 33,33         | não        | 19 / 22,5                                       |
| pH em H <sub>2</sub> O | Padrão        | 10 / 21                       | 33,33         | sim        | ----  |
| pH em KCL              | ----          | 10 / 23                       | 33,33         | sim        | ----  |
| Potássio               | ----          | 10 / 27                       | 33,33         | não        | 10 / 19   |
| Espessura              | Padrão        | 10 / 15                       | 33,33         | não        | 20 / 23   |
| Cor valor              | ----          | 10 / 27                       | 33,33         | não        | 45 / 23   |
| Cor croma              | ----          | 10 / 23                       | 33,33         | não        | 35 / 22,5                                       |

Para os resultados obtidos para os dados do horizonte B (Tabela 02), observa-se que apenas nove atributos, sendo três granulométricos, três químicos e três morfológicos, necessitaram de transformação. Para todos os atributos foram utilizados 10 lags regulares, com intervalos variados entre 16 m e 27m. Metade dos 16 atributos resultaram em modelos anisotrópicos, com as direções variando de 0° a 45° e a tolerância angular variando de 10° a 45°.

TABELA 02 - PARÂMETROS ALCANÇADOS PARA AJUSTE DOS MODELOS EXPERIMENTAIS PARA ATRIBUTOS DO HORIZONTE B

| Elemento               | Transformação | Lag<br>nº / dist. | Cutoff | Isotrópico | Anisotrópico<br>direção /<br>tolerância angular |
|------------------------|---------------|-------------------|--------|------------|---|
| Argila                 | ----          | 10 / 24           | 33,33  | sim        | ----  |
| Silte                  | Padrão        | 10 / 22           | 33,33  | sim        | ----  |
| Areia fina             | Padrão        | 10 / 21           | 33,33  | sim        | ----  |
| Areia grossa           | Padrão        | 10 / 24           | 33,33  | sim        | ----  |
| Alumínio               | Padrão        | 10 / 26           | 33,33  | não        | 0 / 22,5  |
| Calcio                 | ----          | 10 / 23           | 33,33  | não        | 0 / 22,5  |
| Carbono                | Padrão        | 10 / 27           | 33,33  | não        | 45 / 10   |
| Fósforo                | Padrão        | 10 / 26           | 33,33  | não        | 45 / 40   |
| Hidrogênio             | ----          | 10 / 13           | 33,33  | não        | 25 / 45   |
| Magnésio               | ----          | 10 / 28           | 33,33  | sim        | ----  |
| pH em H <sub>2</sub> O | ----          | 10 / 27           | 33,33  | não        | 32 / 22,5                                       |
| pH em KCL              | ----          | 10 / 16           | 33,33  | sim        | ----  |
| Potássio               | ----          | 10 / 25           | 33,33  | não        | 30 / 31   |
| Cor R                  | Padrão        | 10 / 16           | 33,33  | sim        | ----  |
| Cor G                  | Padrão        | 10 / 19           | 33,33  | sim        | ----  |
| Cor B                  | Padrão        | 10 / 23           | 33,33  | não        | 25 / 20   |

Em ambos os horizontes pode-se perceber que os parâmetros alcançados, a partir da combinação dos números dos lags, o tamanho dos lags, presença ou não de anisotropia e da aplicação ou não de uma transformação sobre o conjunto de dados de cada atributo, são diferentes. Isso é causado pelo fato de que cada conjunto de dados possuir valores diferentes e diferentes graus de variabilidade dentro da área.

*Cutoff* é distância máxima considerada, medida em porcentagem da distância máxima existente entre pares de pontos. Adotou-se o mesmo parâmetro para todas as variáveis, pois na etapa seguinte de ajuste do modelo teórico ao experimental as curvas estabilizam antes, ou não ultrapassam a distância máxima estabelecida pelo *cutoff*.

Como pode-se perceber nas Tabelas 01 e 02, alguns atributos tiveram a necessidade de serem submetidos a uma transformação nos dados (Padrão), para o melhor ajuste do grau de dependência espacial. Esta é uma alternativa possível de ser utilizada quando um conjunto de dados apresenta efeito pepita maior que 1 (um). De acordo com Eastman (2005), esta transformação ajusta o conjunto de dados em uma escala que varia de 0 (zero) a 1(um), fazendo com que o efeito pepita reduza



consideravelmente, sem alterar o grau de dependência espacial dos dados, permitindo melhorar a estimativa na interpolação.

#### 4.1.2. Ajuste dos modelos teóricos aos experimentais

As Tabelas 03 e 04 apresentam o tipo de curva, bem como os parâmetros encontrados para melhor ajustar o modelo teórico sobre o modelo experimental dos atributos do solo dos horizontes A e B.

Percebe-se na Tabela 03 que não houve efeito pepita, os alcances variaram de 20 m a 95 m, com patamares variando entre 0,020 e 1,35 e todos ajustados ao modelo exponencial. Apenas para o atributo a areia fina utilizou-se o modelo esférico.

TABELA 03 – PARÂMETROS DAS CURVAS AJUSTADAS SOBRE O MODELO EXPERIMENTAL DOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE A

| Elemento               | Efeito pepita | Alcance (range) | Patamar | Modelo teórico |
|------------------------|---------------|-----------------|---------|----------------|
| Argila                 | 0             | 31              | 0,93    | Exponencial    |
| Silte                  | 0             | 31              | 0,905   | Exponencial    |
| Areia fina             | 0             | 95              | 0,72    | Esférico       |
| Areia grossa           | 0             | 75              | 1,35    | Exponencial    |
| Alumínio               | 0             | 27              | 0,96    | Exponencial    |
| Cálcio                 | 0             | 27              | 0,97    | Exponencial    |
| Carbono                | 0             | 28              | 1,02    | Exponencial    |
| Fósforo                | 0             | 53              | 1,05    | Exponencial    |
| Hidrogênio             | 0             | 34              | 0,93    | Exponencial    |
| Magnésio               | 0             | 30              | 0,90    | Exponencial    |
| pH em H <sub>2</sub> O | 0             | 43              | 0,073   | Exponencial    |
| pH em KCL              | 0             | 54              | 0,088   | Exponencial    |
| Potássio               | 0             | 52              | 0,020   | Exponencial    |
| Espessura              | 0             | 20              | 1,26    | Exponencial    |
| Cor R                  | 0             | 35              | 1       | Exponencial    |
| Cor G                  | 0             | 40              | 1,07    | Exponencial    |
| Cor B                  | 0             | 32              | 1,07    | Exponencial    |
| Cor valor              | 0             | 45              | 0,155   | Exponencial    |
| Cor croma              | 0             | 22,5            | 0,265   | Exponencial    |

TABELA 04 – PARÂMETROS DAS CURVAS AJUSTADAS SOBRE O MODELO EXPERIMENTAL DOS ATRIBUTOS DO HORIZONTE B

| Elemento               | Efeito pepita | Alcance (range) | Patamar | Modelo teórico |
|------------------------|---------------|-----------------|---------|----------------|
| Argila                 | 0             | 32              | 0,98    | Exponencial    |
| Silte                  | 0             | 27              | 0,96    | Exponencial    |
| Areia fina             | 0             | 23              | 0,94    | Exponencial    |
| Areia grossa           | 0             | 67              | 1,35    | Exponencial    |
| Alumínio               | 0             | 34              | 0,92    | Exponencial    |
| Calcio                 | 0             | 33              | 0,103   | Exponencial    |
| Carbono                | 0             | 89              | 1,148   | Exponencial    |
| Fósforo                | 0             | 55              | 0,156   | Exponencial    |
| Hidrogênio             | 0             | 27              | 4       | Exponencial    |
| Magnésio               | 0             | 41              | 0,235   | Exponencial    |
| pH em H <sub>2</sub> O | 0             | 26              | 0,094   | Exponencial    |
| pH em KCL              | 0             | 20              | 0,0295  | Exponencial    |
| Potássio               | 0             | 37              | 0,00233 | Exponencial    |
| Cor R                  | 0             | 20              | 1,13    | Exponencial    |
| Cor G                  | 0             | 18              | 0,98    | Exponencial    |
| Cor B                  | 0             | 30              | 1,07    | Exponencial    |

Percebe-se na Tabela 04 que não houve efeito pepita, com alcances variando de 18 m a 89 m, com patamares variando entre 0,00233 e 1,35 e todos ajustados ao modelo exponencial.

Ao contrário de Czajkowski e Landim (1999) e Sanchez (2005), que em seus estudos foram impedidos de aplicar a geoestatística sobre atributos do solo, pois o conjunto de dados trabalhados apresentou efeito pepita acentuado e puro, observa-se que para todos os atributos aqui trabalhados não houve efeito pepita, que de acordo com Landim (1998), Sanchez (2005), Soares (2000) e Andriotti (2003), quanto menor o efeito pepita no semivariograma menor o erro da estimativa.

Pode-se observar também que os valores de alcance e patamar variaram para cada atributo do solo. Estes valores, quando analisados no semivariograma, indicam o ponto em que a curva estabiliza, significando que além destes valores não possui mais correlação e não serão considerados na predição. Sanchez (2005), em seu trabalho, obteve para os atributos dos solos da camada superficial, patamares variando de 6,23 a 78,63 e diferente disso, o maior patamar obtido neste trabalho foi 1,35. Ainda o mesmo autor, obteve alcances variados, sendo o menor 83,68 e o

maior 357,90, apresentando diferente grau de dependência espacial para os mesmos atributos estudados.

Ao contrário de Sanchez (2005) e Novaes Filho (2007), que afirmam que o modelo esférico é o mais adequado para descrever o semivariograma de propriedades do solo, este modelo conseguiu descrever de maneira satisfatória apenas um atributo (areia fina do horizonte A). Todos os demais atributos foram melhor descritos através do modelo exponencial. Isso mostra que não existe uma regra de qual modelo consegue explicar melhor a correlação ou a dependência espacial dos atributos do solo.

#### 4.1.3. Krigagem

A krigagem foi utilizada nesta etapa do trabalho para realizar a predição dos pontos não amostrados no interior da malha de coleta dos dados.

Com base nos modelos experimentais e teóricos ajustados, estes foram utilizados para informar ao interpolador geostatístico qual o grau de dependência espacial a ser utilizado para a estimativa de cada atributo nos locais não observados. O resultado disso são imagens contínuas, que representam a variabilidade de cada atributo do solo.

A krigagem utilizada para todos os atributos foi a ordinária, pois baseado em Landim e Sturaro (2002), Sanchez (2000) e Druck (2004), este interpolador é utilizado quando a média dos dados é desconhecida e em casos onde a média é considerada flutuante por toda a área e há estacionariedade nos dados.

Os modelos ajustados de semivariograma foram submetidos a um teste de validação para avaliar se os resultados são coerentes. No entanto, para avaliar quais os melhores modelos para cada atributo, utilizou-se a regressão linear simples, conforme sugerido por (Vieira, 2000), em que os valores observados e os estimados puderam ser comparados, sendo utilizados os modelos de semivariograma que apresentaram melhores índices para os coeficientes de correlação e determinação (Tabela 05).

TABELA 05 – ANÁLISE DE REGRESSÃO DA KRIGAGEM

| Elemento               | Horizonte A                |                                  | Horizonte B                |                                  |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
|                        | Coefficiente de Correlação | Coefficiente de Determinação (%) | Coefficiente de Correlação | Coefficiente de Determinação (%) |
| Argila                 | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,95                            |
| Silte                  | 0,99                       | 100                              | 0,98                       | 97,88                            |
| Areia fina             | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,34                            |
| Areia grossa           | 0,99                       | 99,99                            | 0,99                       | 98,34                            |
| Alumínio               | 0,99                       | 99,97                            | 0,99                       | 98,13                            |
| Cálcio                 | 0,99                       | 99,99                            | 0,99                       | 98,85                            |
| Carbono                | 0,99                       | 100                              | 0,97                       | 94,70                            |
| Fósforo                | 0,99                       | 99,97                            | 0,99                       | 99,20                            |
| Hidrogênio             | 0,99                       | 99,99                            | 0,98                       | 96,35                            |
| Magnésio               | 0,99                       | 99,99                            | 0,99                       | 99,10                            |
| pH em H <sub>2</sub> O | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,46                            |
| pH em KCL              | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,41                            |
| Potássio               | 0,99                       | 99,97                            | 0,99                       | 99,45                            |
| Espessura              | 0,99                       | 99,99                            | ----                       | ----                             |
| Cor R                  | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,82                            |
| Cor G                  | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,60                            |
| Cor B                  | 0,99                       | 100                              | 0,99                       | 98,28                            |
| Cor valor              | 0,99                       | 100                              | ----                       | ----                             |
| Cor cromia             | 0,99                       | 99,99                            | ----                       | ----                             |

Baseado em Andriotti (2003) o valor máximo para o coeficiente de correlação é 1, sendo valores superiores a 0,8 indicativos de 80% de correlação ou superior conforme valor encontrado. Para o coeficiente de determinação o valor máximo possível de ser encontrado é 100%, sendo admitido valores superiores a 90%.

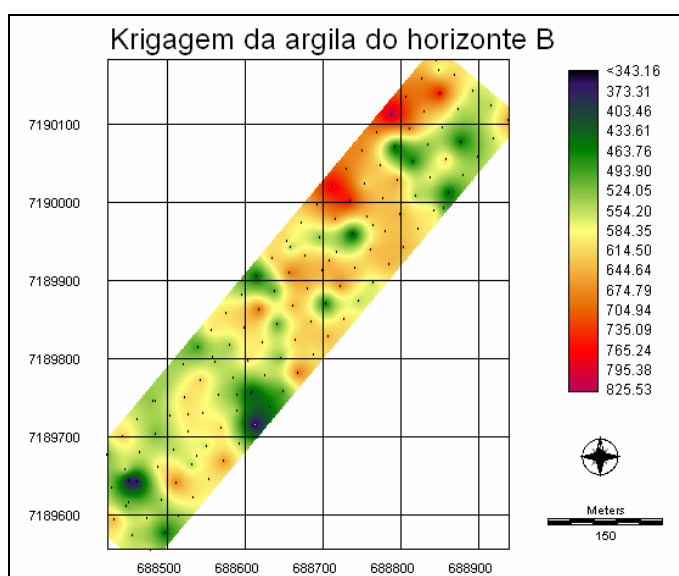
Os coeficientes de correlação encontrados para horizonte A foi de 0,99 e o coeficiente de determinação apresentou valores próximos a 100%. A diferença entre o maior valor e menor valor no coeficiente de determinação foi de 0,03%. Isto mostra que as escolhas dos modelos ajustados conseguem representar de maneira satisfatória as predições.

Os coeficientes de correlação do horizonte B possuem valores elevados, variando de 0,97 a 0,99. Os coeficientes de determinação apresentam variações onde o menor valor é 94,70 e o maior valor é 99,45. Estes índices também representam de maneira satisfatória a escolha dos modelos ajustados para as predições.

Concordando com Valencia, Meirelles e Fucks (2001), Machado et al. (2004) e Bishop e Mc Bratney (2000), que estudaram a variabilidade de nutrientes do solo através da krigagem, os resultados aqui obtidos também foram capazes de representar satisfatoriamente as variações dos atributos por toda a área, o que discordando dos resultados obtidos por Czajkowski e Landim (1999).

Devido ao grande número de krigagens realizadas e com a intenção de não tornar o trabalho repetitivo, serão abordados com mais detalhes os atributos argila do horizonte B, carbono do horizonte B e espessura do horizonte A.

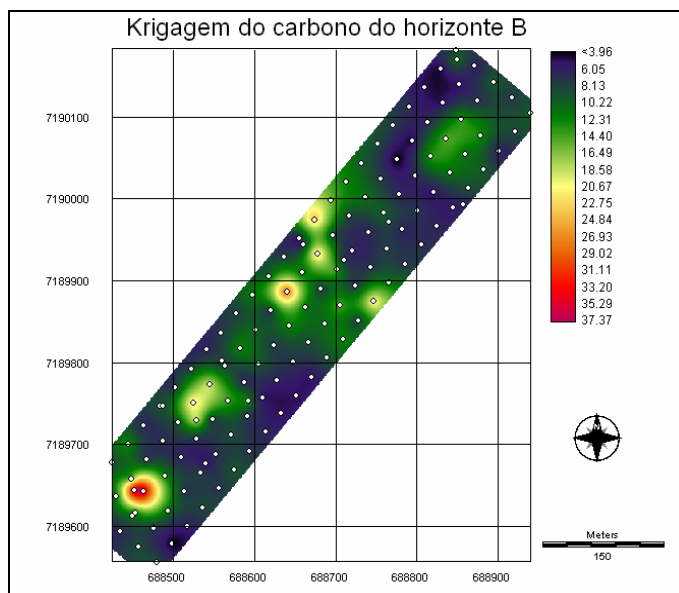
FIGURA 07 – KRIGAGEM DA ARGILA DO HORIZONTE B



As cores da imagem mais próximas do vermelho e do lilás indicam as áreas de maior concentração de argila e as cores mais próximas ao azul as menores concentrações (Figura 07). É possível perceber que os valores de argila variaram de 343,16 g/kg a 825,53 g/kg. Observa-se também que as maiores concentrações de argila ocorrem na porção mais ao Norte da área, em relevo plano a suave ondulado, e diminuem quando seguem ao Sul, para relevos ondulados a forte ondulados. Percebe-se também que entre os pontos amostrados ocorrem grandes variações de concentração de argila no solo. Em alguns casos, em um intervalo de 30m a

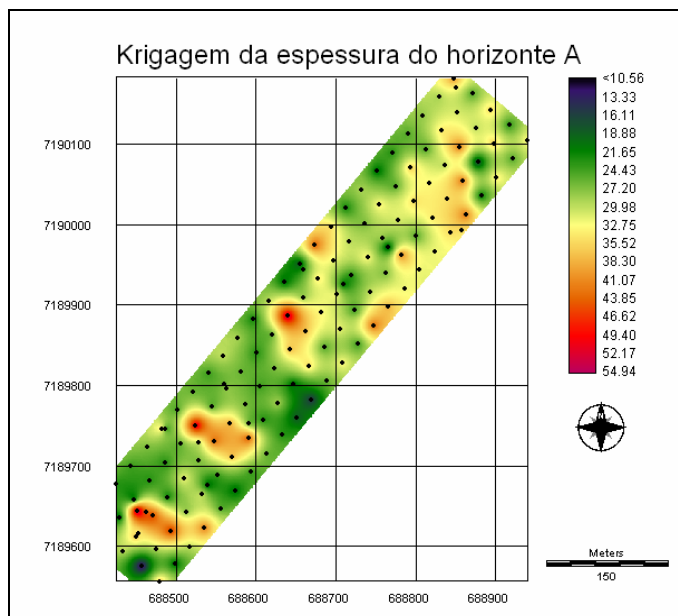
concentração de argila sai de 450 g/kg e vai para 820 g/kg. Provavelmente, esta grande variação na área é causada por estar sobre a Formação Guabirotuba.

FIGURA 08 – KRIGAGEM DO CARBONO DO HORIZONTE B



Outro resultado interessante obtido a partir da krigagem, ocorreu na interpolação dos dados de carbono do horizonte B. Na Figura 08 é possível observar um predomínio de baixas concentrações de carbono (6,05 g/kg a 12,31 g/kg) por toda a área, valores intermediários concentram-se mais ao centro e valores mais elevados (37,37 g/kg) em uma pequena área mais ao sul, contrastando com todo o resto da área. Isto pode estar relacionado a algum erro na análise química ou na coleta da amostra. Percebe-se também que as transições ocorrem de maneira mais suave nas concentrações deste atributo se comparadas com a argila do horizonte B. Isto mostra que cada atributo do solo varia de maneira diferente em uma mesma área.

FIGURA 09 – KRIGAGEM DA ESPESSURA DO HORIZONTE A



Observa-se na Figura 09 que as espessuras do horizonte A variam de 10,56 cm a 54,94 cm. A porção ao Sul apresenta horizonte A menos espesso, em relevo ondulado e forte ondulado e horizonte A mais espesso na porção mais ao Norte, de relevo plano e suave ondulado. No entanto, percebe-se que há a ocorrência em toda a área de espessuras entre 18,88 cm e 24,43 cm. Por a espessura ser um atributo diagnóstico para a classificação do horizonte superficial, com base nesta imagem é possível realizar inferências da ocorrência ou não de alguns destes horizontes, como por exemplo: os horizontes A chernozêmico e A proeminente para serem caracterizados devem apresentar espessura superior a 25 cm; o horizonte A húmico para ser caracterizado, apresenta espessura variada em função da quantidade de carbono orgânico em relação a porcentagem de argila mais a profundidade do perfil; o horizonte A fraco deve apresentar espessura inferior a 5 cm e com base nesta imagem já é possível diagnosticar a sua inexistência.

As Figuras 10 e 11 apresentam todas as krigagens realizadas para os atributos dos horizontes A e B.

Figura 06 - Krigagens dos atributos dos horizontes A e B

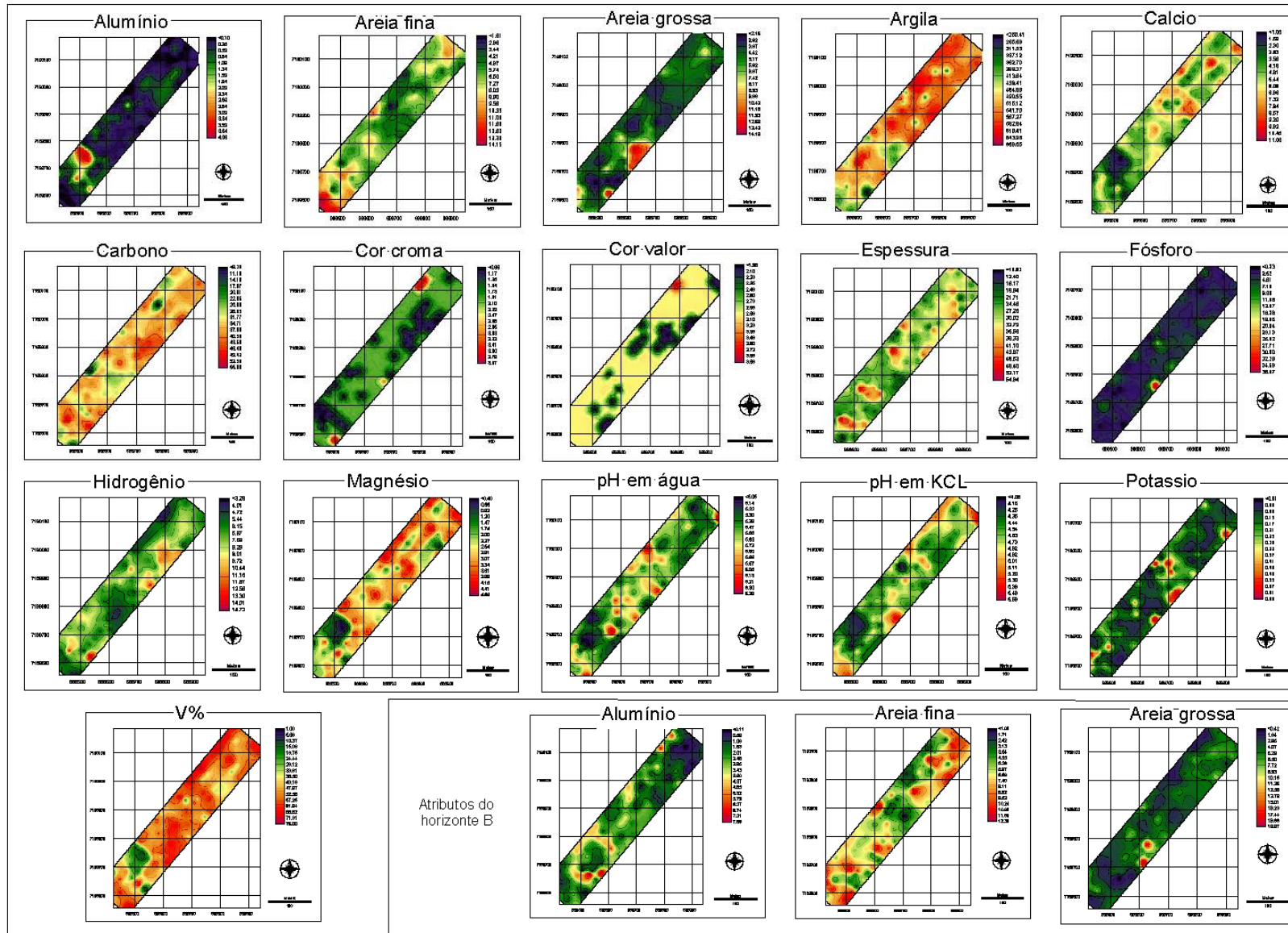
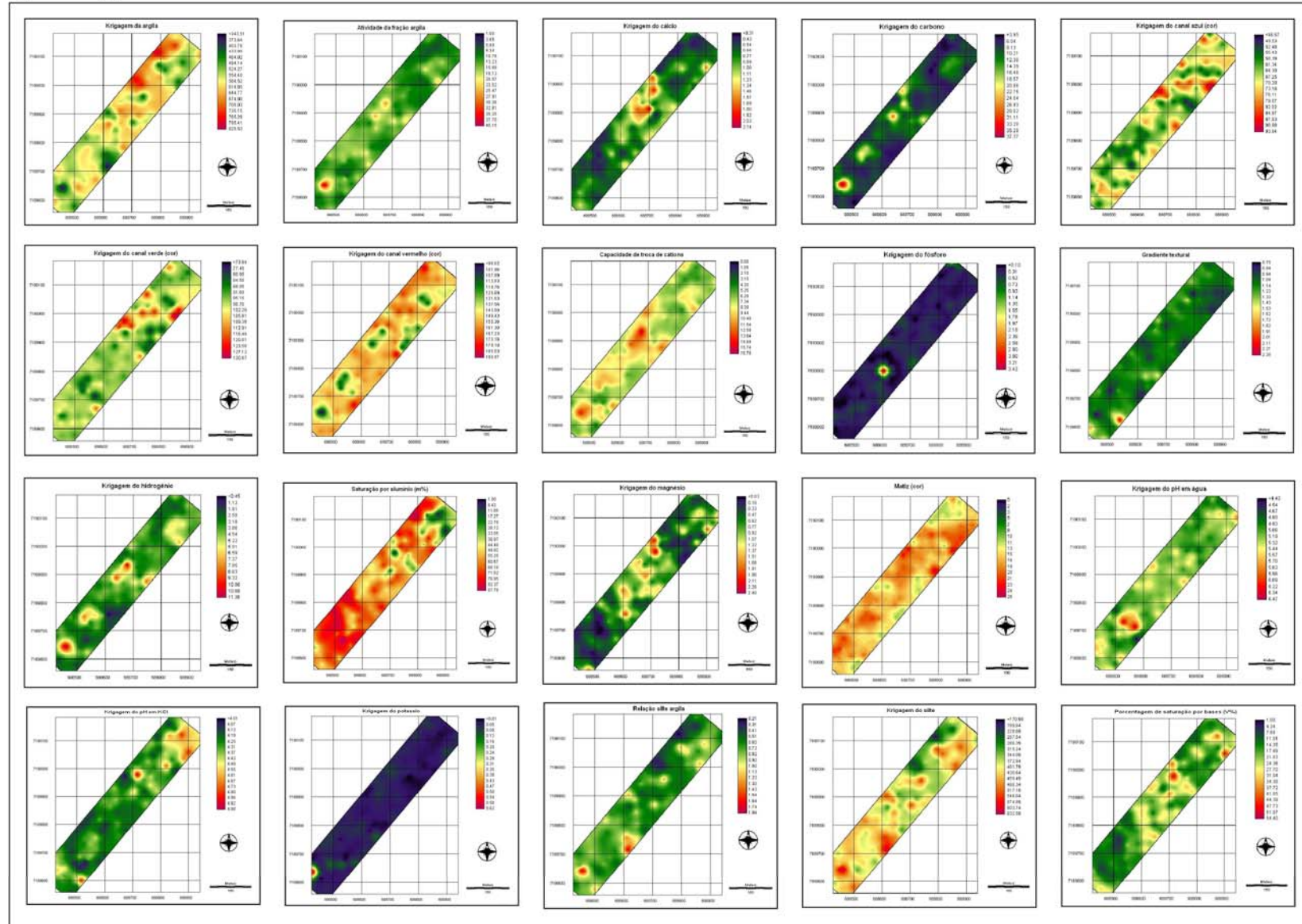




Figura 07 - Krigagens dos atributos do horizonte B



As imagens obtidas a partir da krigagem dos pontos amostrados dos vários atributos permitem rápida visualização, transmitem uma boa idéia de como os atributos estão variando dentro da área e permitem realizar algumas inferências relacionadas aos solos. Estes resultados concordam com a afirmação de Valencia, Meirelles e Fucks (2001), que constataram a aficiência dos métodos de interpolação por krigagem para a estimação espacial dos nutrientes do solo. Confirma também a constatação de Fonseca et al. (2002), que a krigagem apresenta bons resultados e boa visualização da espacialização das concentrações dos atributos.

Os resultados obtidos neste trabalho, da interpolação por krigagem, confirmam as hipóteses de Sanchez (2005) e Mc Bratney, Mendonça Santos e Minasny (2003), que mencionam que as imagens resultantes das krigagens podem fornecer informações que permitem entender melhor o padrão de distribuição espacial e através da espacialização destas variáveis, podem auxiliar na delimitação de unidades de mapeamento.

Em acordo com as afirmações e conclusões de Novaes Filho (2007) e Florence Carre e Girard (2002), que relatam a eficácia dos métodos de interpolação por krigagem para a espacialização dos atributos do solo, como informação básica para a identificação das classes de solos e geração de unidades de mapeamento. Estes autores, com base nestes resultados classificaram e mapearam solos, no entanto utilizaram um sistema de classificação próprio e simplificado.

#### 4.2. ÁLGEBRA DE MAPAS

Neste tópico, será apresentado o processo de tomada de decisões e álgebra de mapas a partir dos produtos obtidos das krigagens.

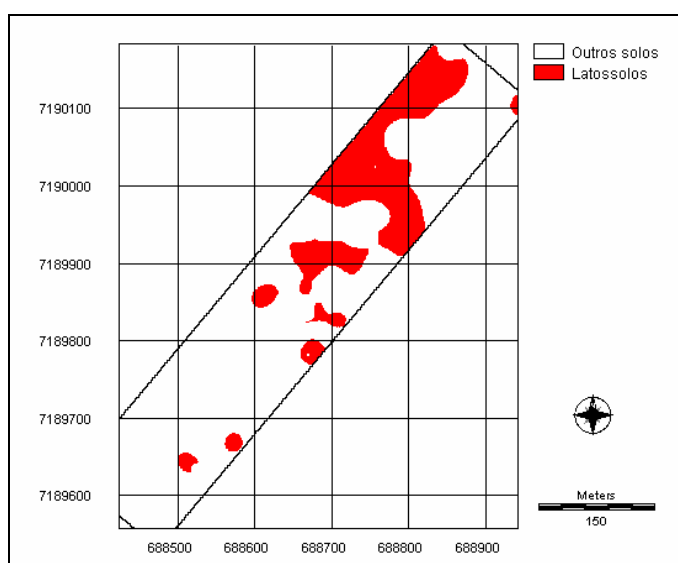
#### 4.2.1. Critérios e parâmetros utilizados para a classificação até o 3º nível categórico

Primeiramente realizou-se a classificação de todos os solos até o nível de grande grupo, utilizando os critérios e parâmetros descritos por EMBRAPA (1999).

Como exemplo e com objetivo de apresentar de forma mais clara o processo de classificação e mapeamento dos solos, será apresentada a seguir a tomada de decisões utilizada para a classe dos latossolos até o nível de grande grupo.

Para a identificação do horizonte B latossólico aplicou-se a análise booleana nos atributos do solo, recebendo valor unitário quando os atributos apresentaram os seguintes valores: CTC menor que 17 cmol/kg, gradiente textural inferior a 1,5, relação silte/argila inferior a 0,6, atividade de argila menor que 27 cmol/kg e textura do horizonte B mais fina que franco arenosa (EMBRAPA, 1999) (Figura 12).

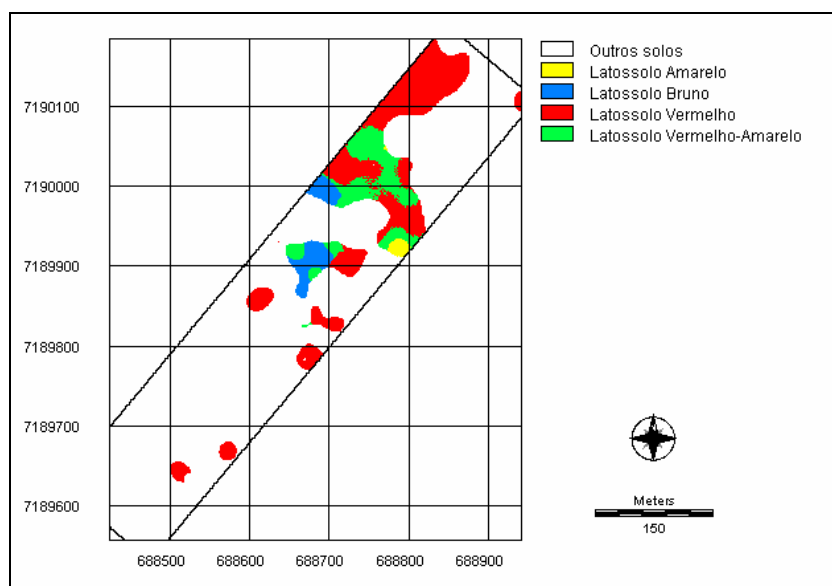
FIGURA 12 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS LATOSSOLOS



No segundo nível categórico, as ordens foram subdivididas em relação às cores encontradas no horizonte B, conforme sugerido pela EMBRAPA (1999). Para os diferentes Latossolos utilizaram-se os seguintes valores: para Latossolos amarelos, matiz 7,5YR ou mais amarelo; para Latossolo bruno, matiz 5YR ou mais amarelo, tendo que apresentar ainda espessura superior a 30 cm, carbono orgânico

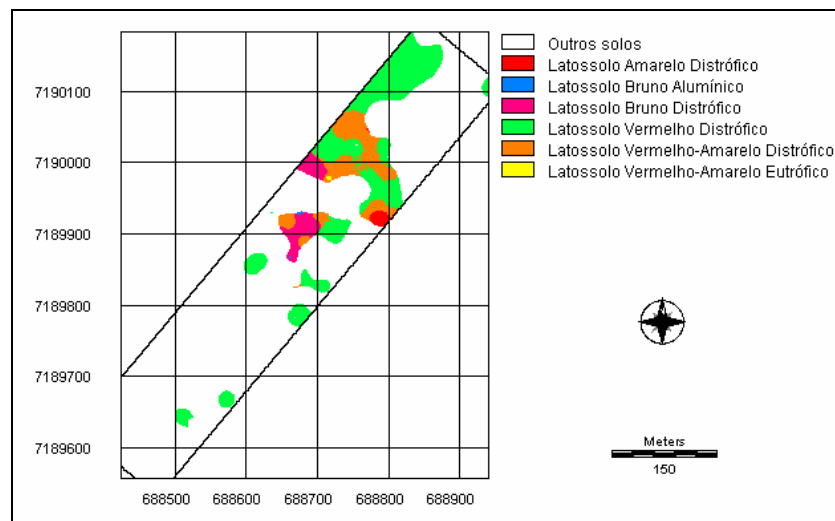
maior que 1% e textura siltosa ou mais fina; para latossolo vermelho, matiz 2,5YR ou mais vermelho e para o latossolo vermelho-amarelo, a matiz 5YR. Desta maneira, foi possível identificar quatro subdivisões, que são: Latossolo Amarelo, Latossolo Bruno, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-amarelo. (Figura 13).

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DOS LATOSSOLOS NO 2º NÍVEL CATEGÓRICO



Para o nível de grande grupo foram utilizados os critérios conforme sugerido por EMBRAPA (1999), tais como: eutrófico (V% maior que 50%), distrófico (V% menor que 50%), alumínico (V% menor que 50%, m% maior ou igual a 50% e alumínio extraível maior ou igual a 4). Desta maneira foram identificadas as seguintes unidades taxonômicas: Latossolo Amarelo Distrófico, Latossolo Bruno Alumínico, Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (Figura 14).

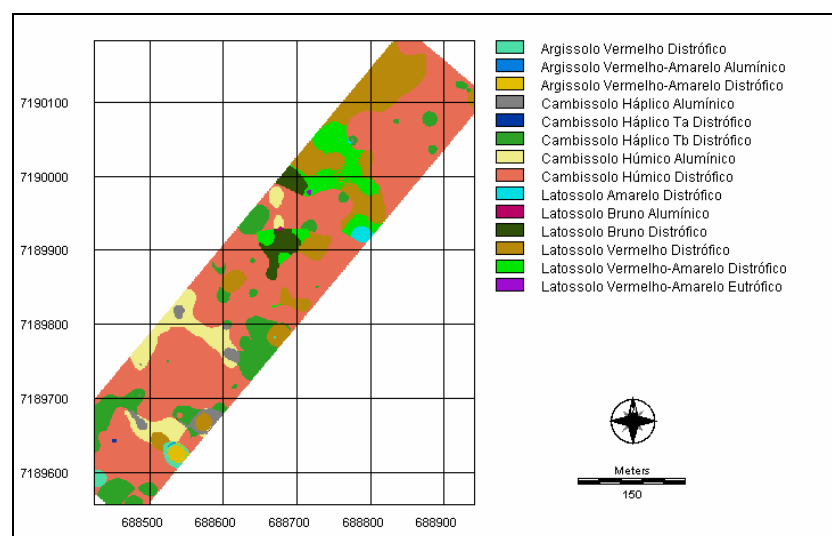
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DOS LATOSSOLOS NO 3º NÍVEL CATEGÓRICO



O procedimento adotado para a classe dos latossolos foi também aplicado para os cambissolos e argissolos. Desta forma foi possível identificar, classificar e mapear todos os solos ocorrentes, os quais são apresentados na Figura 15.

O processo de classificação de solos utilizado foi de acordo com outros levantamentos de solos já realizados, como: Brasil (1967); Brasil (1966); EMBRAPA (1984); IAC (1978); e Oliveira et al., (1982).

FIGURA 15 – MAPA DAS UNIDADES TAXÔMICAS OCORRENTES AO NÍVEL DE GRANDE GRUPO



Para facilitar a classificação ao 4º nível categórico, optou-se por aplicar os critérios cartográficos de área mínima mapeável e de unidades simples, combinadas e associações (EMBRAPA, 1995).

Tal procedimento teve como objetivo reduzir o número de polígonos a interpretar, que seriam criados com a subdivisão destes quando classificados ao 4º nível categórico, tornando menos confuso o trabalho e sem que estes posteriormente fossem representados no mapa final.

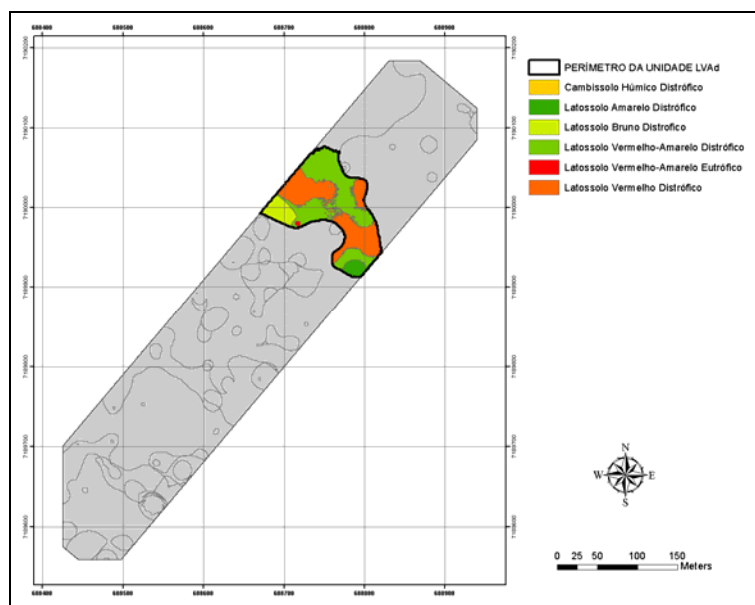
Desta forma, a classificação ao 4º nível categórico se deu sobre as unidades taxonômicas predominantes que denominaram a unidade de mapeamento no 3º nível. Tal procedimento será apresentado no tópico a seguir.

#### 4.2.2. Critérios e parâmetros utilizados para a classificação ao nível de Sub-Grupo.

Para a classificação ao quarto nível categórico, aplicaram-se primeiramente os critérios cartográficos, tais como: área mínima mapeável de 0,4 ha para a escala de publicação de 1:10.000, os conceitos de unidades simples e associações EMBRAPA (1995).

O Quadro 05 apresenta o número de polígonos referente a cada unidade taxonômica, a soma das áreas destes em hectares (ha) e metros quadrados (m²) e o percentual de cada classe de solo em relação a área total, da unidade de mapeamento LVAd (Figura 16).

FIGURA 16 – AGRUPAMENTO DE SOLO E DELINEAMENTO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO



QUADRO 05 – SÍNTESE DA UNIDADE DE MAPEAMENTO LVAD

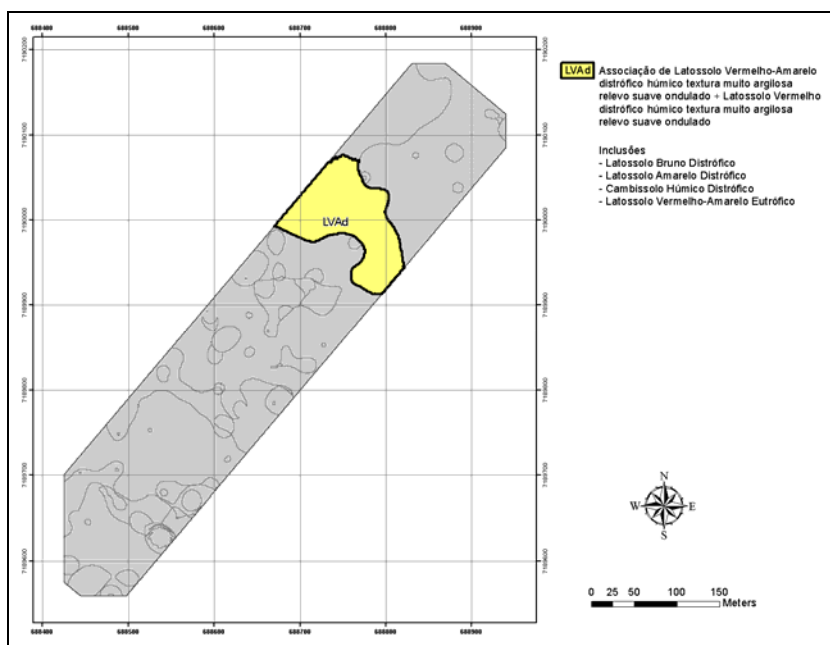
| Unidades taxonômicas                 | Número de polígonos | área em ha | área em m <sup>2</sup> | %     |
|--------------------------------------|---------------------|------------|------------------------|-------|
| Cambissolo Húmico Distrofco          | 1                   | 0,0004     | 4,05                   | 0,04  |
| Latossolo Amarelo Distrofco          | 6                   | 0,0503     | 502,63                 | 4,41  |
| Latossolo Bruno Distrofco            | 1                   | 0,0957     | 956,72                 | 8,39  |
| Latossolo Vermelho-Amarelo Distrofco | 56                  | 0,5252     | 5251,74                | 46,06 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico | 1                   | 0,0035     | 35,40                  | 0,31  |
| Latossolo Vermelho Distrofco         | 91                  | 0,4652     | 4651,98                | 40,80 |
| TOTAL                                | 156                 | 1,1403     | 11402,52               | 100   |

Primeiramente buscou-se identificar a presença de polígonos com área superior à área mínima mapeável (0,4 ha), no interior desta unidade. Neste caso, não foi constatada nenhuma unidade taxonômica com polígono isolado capaz de ser representado de maneira independente como uma unidade de mapeamento simples.

Desta maneira, verificou-se quais classes de solos possuíam área total superior a 20% da área total da unidade e que constituíram a combinação para a denominação da unidade de mapeamento. As demais classes de solos com área

inferior a 20% da área total da unidade foram enquadradas como inclusões, conforme sugerido pela EMBRAPA (1995) (Figura 17).

FIGURA 17 – UNIDADE DE MAPEAMENTO LVAd

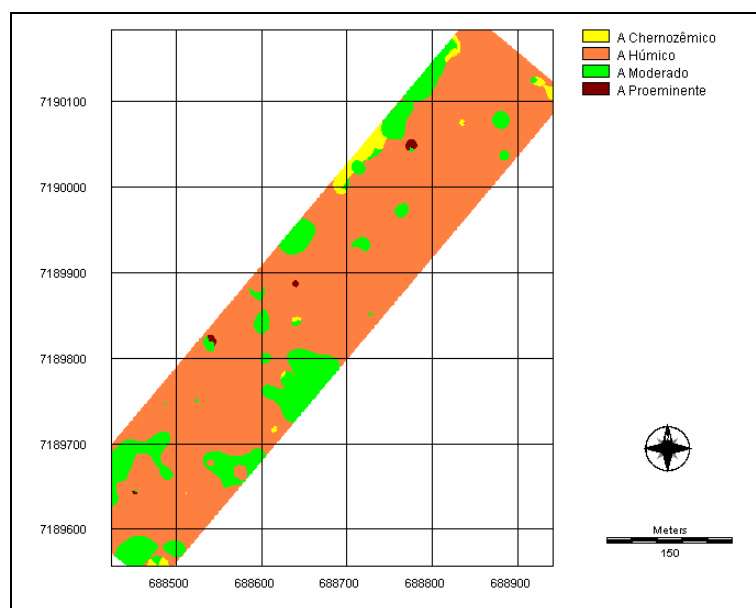


Identificadas as unidades taxonômicas predominantes no 3º nível categórico, estas foram classificadas ao 4º nível categórico. Para isto utilizaram-se os seguintes critérios: presença de horizonte A húmico para a classe dos Latossolos e o caráter latossólico para a classe dos Cambissolos, conforme sugerido pela EMBRAPA (1999).

Além das informações mencionadas utilizou-se a subdivisão das unidades de mapeamento em função do tipo de horizonte A (Figura 18), agrupamento de classe textural (Figura 19) e classe de declive (Figura 20), concordando com EMBRAPA (1984) e Oliveira e Prado (1984).

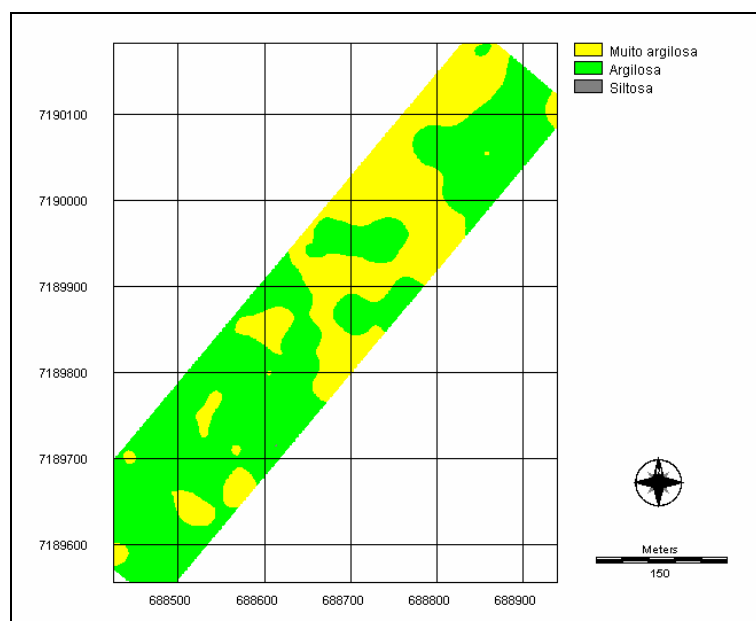


FIGURA 18 – DISPOSIÇÃO DOS HORIZONTES A



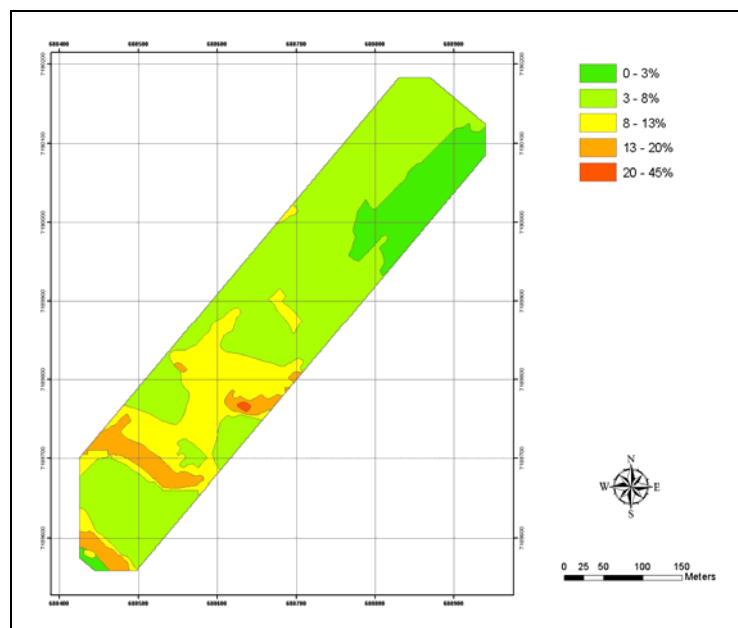
Percebe-se que o horizonte A húmico predomina em toda a área, apresentando coloração salmão, como pode ser visualizado na Figura 18. O horizonte A moderado tem sua ocorrência nos limites da área, apresentando as áreas mais expressivas ao Sul. Ainda de percebe que na parte interior na área de trabalho, sua ocorrência é dispersa e em pequenas áreas. A ocorrência dos horizontes A chernozêmico e A proeminente quando comparada com os horizontes A húmico e A moderado, é inexpressiva.

FIGURA 19 – AGRUPAMENTO DE CLASSES TEXTURAIS DO HORIZONTE B



Percebe-se que a classe muito argilosa de cor amarela no mapa ocorre predominantemente ao Norte na área, onde as variações altimétricas são menores. A classe argilosa, de cor verde no mapa, ocorre predominantemente nas porções mais elevadas ao Sul. Não é percebida a ocorrência da classe siltosa, pois esta, de cor cinza no mapa, é representada apenas por um píxel (Figura 19).

FIGURA 20 – MAPA DE DECLIVIDADE



A classe de declividade predominante na área é a suave ondulada (3-8%), representada pela cor verde clara, identificada em quase toda a extensão da área. A classe de declividade plana (0-3%) ocorre somente ao Norte da área, representada pela cor verde escura. A coloração amarela correspondente à classe de declividade moderadamente ondulada (8-13%), ocorrendo nas porções centro-sul da área. As classes de declividade ondulada (13-20%) e forte ondulada (20-45%) ocorrem de maneira isolada em pequenas porções ao Sul da área.

A unidade de mapeamento mais expressiva é a CHd1 (no centro da área), com 1,98 ha, o que corresponde a 18,79% da área total. Esta unidade de mapeamento enquadra-se como unidade simples, apresentando as seguintes inclusões: Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Bruno distrófico, Cambissolo Háplico Tb distrófico, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Cambissolo húmico aluminico, Argissolo Vermelho distrófico e Latossolo Bruno aluminico.

A segunda unidade de maior representatividade é a CHd4 (ao Sul da área), com 1,37 ha, correspondendo a 13% da área total. Esta unidade de mapeamento caracteriza-se por unidade simples contendo a seguinte inclusão: Cambissolo Háplico Tb distrófico.

A terceira unidade de mapeamento mais expressiva é a CHd5 (no centro da área), com 1,35 ha de área, correspondendo a 12,81% da área total. Esta é uma associação de duas unidades taxonômicas, contendo a unidade taxonômica Latossolo Vermelho distrófico como inclusão.

A quarta unidade em maior representatividade é a LVAd (ao Norte da área), com 1,14 ha, correspondendo a 10,82% da área total. Esta é uma associação de dois Latossolos, contendo as seguintes inclusões: Latossolo Bruno distrófico, Latossolo Amarelo distrófico, Cambissolo Húmico distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico.

As demais unidades CHa, CHd2, CHd3, CHd6, CXbd e LVd somam 4,70 ha correspondendo a 44,59% da área total.

A Tabela 06 apresenta a área de cada unidade de mapeamento e seu percentual de ocorrência.

TABELA 06 – ÁREA DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO EM PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA

| Unidade de Mapeamento | Área em ha | Porcentagem da área total |
|-----------------------|------------|---------------------------|
| CHa                   | 0,48       | 4,55                      |
| CHd1                  | 1,98       | 18,79                     |
| CHd2                  | 1,01       | 9,58                      |
| CHd3                  | 0,84       | 7,97                      |
| CHd4                  | 1,37       | 13,00                     |
| CHd5                  | 1,35       | 12,81                     |
| CHd6                  | 0,92       | 8,73                      |
| CXbd                  | 0,79       | 7,50                      |
| LVAd                  | 1,14       | 10,82                     |
| LVd                   | 0,66       | 6,26                      |

A Figura 21 apresenta o mapa de solos obtido, que confirma as afirmativas de Mc. Bratney, Mendonça Santos e Minasny (2003) e Florence Carre e Girard (2002), que é possível elaborar mapas digitais de solos através da predição dos atributos do solo baseado em um sistema de amostragem de solos e estes processados em Sistemas de Informações Geográficas.

Ao comparar as unidades de mapeamento obtidas com as unidades de mapeamento do Levantamento de Reconhecimento do estado do Paraná (EMBRAPA, 1984) que ocorrem na região da área de estudo, percebe-se que a classe dos Latossolos Brunos Ácricos, Organossolos, Alissolos Crômicos, Neossolos litólicos e solos hidromórficos não foram identificados na área de estudo, o que discorda do trabalho de levantamento realizado. Provavelmente os Organossolos e solos hidromórficos situam-se nos fundos de vale, nas porções mais baixas do relevo, e por a área de estudo estar situada a partir do topo da vertente até meia encosta, nas suas porções menos elevadas, estes solos não foram identificados.

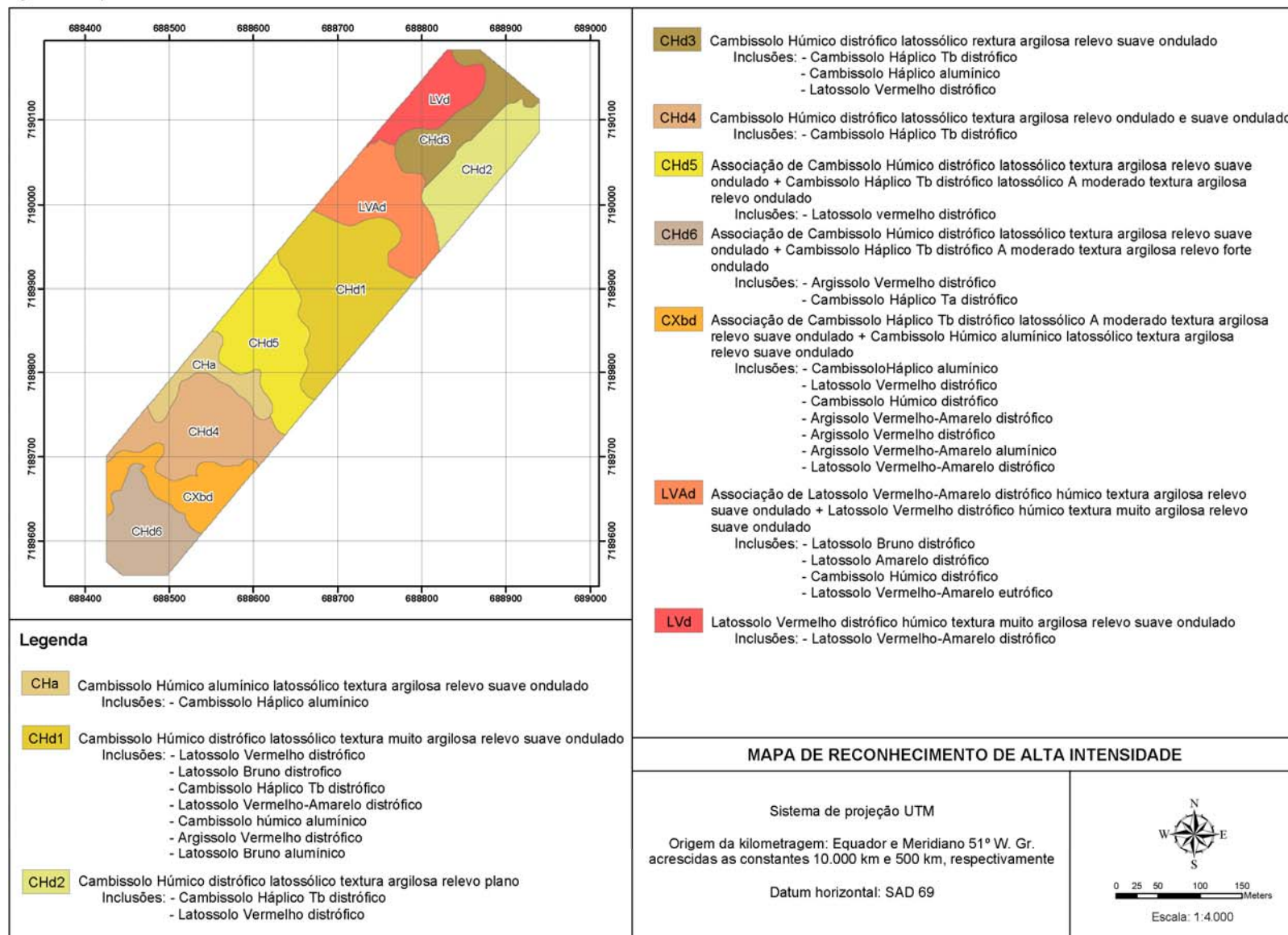
Já os Cambissolos Húmicos alumínicos, os Latossolos Brunos distroficados e Cambissolos Háplicos Tb distroficados foram mapeados, concordando com EMBRAPA (1984).

A ocorrência de inclusões de Argissolos Vermelho-Amarelo Distrofido, Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico e Argissolo Vermelho Distrofido mapeadas no interior de algumas unidades de mapeamento, estão de acordo com o Levantamento de Reconhecimento do Estado do Paraná (EMBRAPA, 1984).

Nota-se, que a classe de maior ocorrência neste levantamento (Cambissolo Húmico Distrofido) não é mencionada como associação nem como inclusão de unidades de mapeamento do Levantamento de Reconhecimento do Estado do Paraná, que caracterizam a região da área de estudo.

O Levantamento do Estado do Paraná caracteriza-se por um levantamento de reconhecimento de baixa intensidade e o levantamento realizado, por um levantamento de reconhecimento de alta intensidade. O trabalho de levantamento de solos do estado do Paraná, possui área mínima mapeada superior a área total da área de estudo e o número de observações do trabalho de levantamento de solos realizado ultrapassa o recomendado para levantamentos ultradetalhados. Nesta situação, as informações geradas no trabalho realizado, podem não ser identificadas no trabalho de levantamento de solos do estado do Paraná (EMBRAPA, 1984). A escala cartográfica utilizada, a área mínima mapeada, o número de observações realizadas, a extensão das áreas trabalhadas e o propósito de cada trabalho, torna incompatível uma análise comparativa entre os resultados dos trabalhos.

Figura 21 - Mapa de solos



#### 4.3 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO POR UNIDADE DE MAPEAMENTO

Da mesma maneira que Oliveira e Prado (1984) e Oliveira et al. (1982), a Tabela 07 apresenta a análise estatística realizada com objetivo de apresentar as variações dos atributos do solo ocorrentes no interior de cada unidade de mapeamento. Esta análise é de grande relevância, pois além de mostrar todas as variações que podem ocorrer em uma unidade de mapeamento, ela mostra que um mapa de solos jamais deve ser analisado e interpretado somente pela legenda, pois se realizado desta forma, podem ocorrer inferências incorretas. A utilização deste mapa em trabalhos de campo pode identificar unidades taxonômicas diferentes da unidade mapeada.

TABELA 07 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO POR UNIDADE DE MAPEAMENTO

|             | Atributos        | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média  | Desvio padrão |
|-------------|------------------|--------------|--------------|--------|---------------|
| <b>CHa</b>  | Atividade Argila | 14,490       | 20,338       | 16,309 | 0,948         |
|             | Gradiente        | 0,993        | 1,237        | 1,127  | 0,058         |
|             | CTC              | 7,184        | 9,721        | 8,649  | 0,372         |
|             | m%               | 61,516       | 86,356       | 76,026 | 5,439         |
|             | Relação S/A      | 0,638        | 1,329        | 0,865  | 0,129         |
|             | V%               | 8,984        | 28,808       | 16,084 | 5,322         |
| <b>CHd1</b> | Atividade Argila | 8,968        | 27,074       | 14,972 | 2,956         |
|             | Gradiente        | 0,887        | 1,524        | 1,119  | 0,082         |
|             | CTC              | 6,082        | 16,786       | 8,950  | 1,809         |
|             | m%               | 17,589       | 78,48        | 54,647 | 8,966         |
|             | Relação S/A      | 0,440        | 1,311        | 0,661  | 0,105         |
|             | V%               | 9,123        | 47,404       | 23,583 | 4,927         |
| <b>CHd2</b> | Atividade Argila | 7,740        | 24,357       | 13,210 | 2,585         |
|             | Gradiente        | 0,822        | 1,241        | 1,009  | 0,068         |
|             | CTC              | 4,242        | 10,789       | 7,215  | 1,058         |
|             | m%               | 5,914        | 77,467       | 46,079 | 16,183        |
|             | Relação S/A      | 0,516        | 1,213        | 0,795  | 0,122         |
|             | V%               | 7,877        | 48,101       | 20,089 | 6,635         |
| <b>CHd3</b> | Atividade Argila | 7,673        | 20,367       | 12,336 | 2,471         |
|             | Gradiente        | 0,801        | 1,486        | 1,073  | 0,073         |
|             | CTC              | 4,631        | 9,423        | 6,841  | 1,068         |
|             | m%               | 5,360        | 77,214       | 42,052 | 15,488        |
|             | Relação S/A      | 0,593        | 1,228        | 0,767  | 0,122         |
|             | V%               | 12,039       | 42,563       | 22,160 | 4,729         |

| Tabela 07 - Continuação |                  |              |              |        |               |
|-------------------------|------------------|--------------|--------------|--------|---------------|
|                         | Atributos        | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média  | Desvio padrão |
| <b>CHd4</b>             | Atividade Argila | 8,138        | 21,293       | 14,161 | 2,714         |
|                         | Gradiente        | 0,808        | 1,284        | 1,087  | 0,083         |
|                         | CTC              | 4,483        | 10,720       | 7,794  | 1,428         |
|                         | m%               | 45,016       | 83,894       | 69,228 | 8,935         |
|                         | Relação S/A      | 0,602        | 1,842        | 0,800  | 0,188         |
|                         | V%               | 4,386        | 30,057       | 15,264 | 4,619         |
| <b>CHd5</b>             | Atividade Argila | 9,707        | 25,993       | 14,507 | 2,418         |
|                         | Gradiente        | 0,891        | 1,490        | 1,117  | 0,102         |
|                         | CTC              | 5,381        | 13,096       | 8,143  | 1,357         |
|                         | m%               | 42,532       | 78,924       | 57,704 | 7,521         |
|                         | Relação S/A      | 0,424        | 1,292        | 0,766  | 0,141         |
|                         | V%               | 12,439       | 34,688       | 23,105 | 4,082         |
| <b>CHd6</b>             | Atividade Argila | 6,934        | 40,148       | 15,294 | 5,649         |
|                         | Gradiente        | 0,747        | 1,719        | 1,190  | 0,159         |
|                         | CTC              | 3,740        | 14,562       | 7,914  | 2,136         |
|                         | m%               | 34,339       | 78,799       | 63,089 | 8,254         |
|                         | Relação S/A      | 0,556        | 1,741        | 0,877  | 0,189         |
|                         | V%               | 7,575        | 30,615       | 16,984 | 6,168         |
| <b>CXbd</b>             | Atividade Argila | 7,419        | 22,270       | 13,908 | 2,282         |
|                         | Gradiente        | 0,977        | 2,303        | 1,236  | 0,203         |
|                         | CTC              | 4,218        | 11,774       | 8,160  | 1,422         |
|                         | m%               | 34,223       | 87,304       | 73,938 | 7,977         |
|                         | Relação S/A      | 0,471        | 0,955        | 0,696  | 0,087         |
|                         | V%               | 10,903       | 21,774       | 14,105 | 1,742         |
| <b>LVA<sub>d</sub></b>  | Atividade Argila | 8,795        | 18,003       | 11,487 | 1,717         |
|                         | Gradiente        | 0,998        | 1,414        | 1,143  | 0,052         |
|                         | CTC              | 5,540        | 12,064       | 7,582  | 1,394         |
|                         | m%               | 5,890        | 80,537       | 57,097 | 12,837        |
|                         | Relação S/A      | 0,273        | 0,603        | 0,514  | 0,081         |
|                         | V%               | 9,041        | 54,405       | 20,797 | 7,540         |
| <b>LV<sub>d</sub></b>   | Atividade Argila | 6,688        | 14,212       | 9,496  | 1,662         |
|                         | Gradiente        | 1,065        | 1,365        | 1,182  | 0,052         |
|                         | CTC              | 4,446        | 9,503        | 6,500  | 1,165         |
|                         | m%               | 19,595       | 87,795       | 66,836 | 14,502        |
|                         | Relação S/A      | 0,207        | 0,600        | 0,456  | 0,083         |
|                         | V%               | 9,368        | 32,308       | 16,688 | 4,527         |

Percebe-se que a unidade LV<sub>d</sub> é mais homogênea que a LV<sub>Ad</sub>, pois apesar de apresentar elevada variabilidade na relação silte/argila, na saturação por alumínio e saturação por bases, estes valores contemplam os limites para a classe dos Latossolos. A inclusão desta unidade também é classificada como Latossolo, o que propiciou menor variabilidade dos atributos em relação à unidade LV<sub>Ad</sub>.

Já na unidade LV<sub>Ad</sub>, a variação dos atributos está relacionada à presença de inclusões diferentes das unidades taxonômicas que denominam a unidade de mapeamento, fato que pode ser observado pela relação silte/argila que apresenta



valores acima de 0,6. Ressalta-se que esta unidade de mapeamento apresenta ainda outras inclusões semelhantes às unidades taxonômicas que deram nome à unidade de mapeamento.

A grande variabilidade encontrada nos atributos da unidade CXbd, estão além dos limites estabelecidos para as classes de solo que dão nome à unidade de mapeamento. Isso pode ser observado no gradiente textural cujos valores ultrapassam o limite mínimo estabelecido para Argissolos (1,5). A relação silte/argila apresenta valores de 0,4, que atendem os critérios para os Latossolos. A grande variabilidade nos atributos do solo presente nesta unidade de mapeamento ocorre devido às seguintes inclusões: Cambissolo háplico alumínico, Latossolo Vermelho distrófico, Cambissolo húmico distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Argissolo Vermelho distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico e Latossolo-Amarelo distrófico.

Ainda na Tabela 07 a classe dos Cambissolos húmicos distróficos os valores discrepantes em relação à unidade taxonômica que denomina a unidade de mapeamento, no que se refere ao gradiente textural, os valores variam entre 1,524 na unidade CHd1 e 1,719 na unidade CHd6, valores estes que atendem os critérios para a classe dos Argissolos. Em relação à atividade de argila, o valor 40,148 ocorre na unidade CHd6, o que caracteriza argila de atividade alta, o que não ocorre nas classes que deram nome à unidade de mapeamento. Quanto à relação silte/argila, o valor 0,602 ocorre na unidade CHd4, o que não caracteriza a unidade taxonômica dos Latossolos.

O menor desvio de saturação por alumínio (5,439), porém elevado se comparado aos outros atributos, ocorreu na unidade Cha, por esta unidade ser composta somente por solos com caráter alumínico. E mesmo com um desvio relativamente elevado, ao analisar os valores mínimos e máximos, constata-se que estes estão dentro dos limites exigidos para contemplar tal caráter. As variações ocorridas nos demais atributos não afetam a unidade taxonômica que deu nome à unidade de mapeamento.

Percebe-se ainda que os índices de saturação por bases das unidades de mapeamento também apresentaram desvios mais expressivos, porém os valores

mínimos e máximos permanecem nos limites estabelecidos para os caracteres distrófico, alumínico, Ta distrófico e Tb distrófico, encontrados nas unidades taxonômicas que denominam as unidades de mapeamento. No entanto, somente a unidade LVAd apresentou valor máximo de saturação por bases superior a 50%, por apresentar inclusão de solo eutrófico, não caracterizando a unidade taxonômica predominante na unidade de mapeamento.

Entretanto, ao realizar a mesma análise somente sobre as unidades taxonômicas que dão nome à unidade de mapeamento, verificou-se que as variações dos atributos do solo atendem os critérios que determinaram sua classe. A Tabela 08 apresenta como exemplo a análise realizada na unidade CXbd.

A unidade CXbd é uma associação de Cambissolo Háplico Tb distrófico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado + Cambissolo Húmico Alumínico textura argilosa relevo suave ondulado. Quando comparados os resultados estatísticos da unidade de mapeamento sem as inclusões, percebe-se que a variabilidade nos atributos diminui em relação aos resultados estatísticos da unidade considerando as inclusões. Ao analisar os atributos sem considerar as inclusões, verificou-se que todos atendem os critérios e parâmetros que definem estas duas unidades taxonômicas.

TABELA 08 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CLASSE DE SOLO PREDOMINANTE NA UNIDADE DE MAPEAMENTO CXBD

| Com inclusões    |              |              |        |               |
|------------------|--------------|--------------|--------|---------------|
|                  | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média  | Desvio padrão |
| Atividade Argila | 7,419        | 22,270       | 13,908 | 2,282         |
| Gradiente        | 0,977        | 2,303        | 1,236  | 0,203         |
| CTC              | 4,218        | 11,774       | 8,160  | 1,422         |
| m%               | 34,223       | 87,304       | 73,938 | 7,977         |
| Relação S/A      | 0,471        | 0,955        | 0,696  | 0,087         |
| V%               | 10,903       | 21,774       | 14,105 | 1,742         |
| Sem inclusões    |              |              |        |               |
|                  | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média  | Desvio padrão |
| Atividade Argila | 7,765        | 16,631       | 12,218 | 1,065         |
| Gradiente        | 0,977        | 1,252        | 1,126  | 0,022         |
| CTC              | 4,218        | 8,933        | 12,218 | 0,644         |
| m%               | 34,222       | 82,056       | 72,099 | 5,331         |
| Relação S/A      | 0,602        | 0,955        | 0,724  | 0,040         |
| V%               | 10,974       | 21,774       | 15,221 | 1,165         |

Os resultados estatísticos obtidos de cada unidade de mapeamento mostram as variações dos atributos do solo que ocorrem no interior das unidades de mapeamento. Isso não quer dizer que a classificação dos solos está errada. Os valores que fogem aos limites das classes de solos predominantes nas unidades de mapeamento é resultado da aplicação dos Procedimentos Normativos de Levantamentos Pedológicos (EMBRAPA, 1995).

#### 4.4 AVALIAÇÃO DO NÚMERO DE OBSERVAÇÕES POR UNIDADE DE MAPEAMENTO.

A partir dos limites das unidades de mapeamento obtidos no mapa final, foram extraídas informações que nos permitem realizar algumas inferências quanto à densidade de observações.

Conforme citado anteriormente nos parâmetros estabelecidos para levantamentos pedológicos, tendo em vista o nível categórico atingido (subgrupo), o mapeamento é enquadrado como levantamento de reconhecimento de alta intensidade. Para esta tipo de levantamento são recomendadas (EMBRAPA, 1995) escala de publicação entre 1:50.000 e 1:100.000, área mínima mapeável variando de 10 a 40 ha conforme a escala e a densidade de observações variando entre 0,04 e 2 observações por km<sup>2</sup>.

No entanto, o número de observações, a escala de publicação e a área mínima mapeada são muito superiores ao recomendado. É apresentado na Tabela 09 o valor médio de 12,88 observações por hectare. Observa-se ainda que o número de observações por unidade de mapeamento variou de 8 a 25. Esta variação é resultado do espaçamento regular pré-fixado (malha) utilizado na coleta das amostras, onde o número de pontos por unidade de mapeamento é resultado do número de pontos situados no interior das unidades de mapeamento. O números de observações por ha para cada uma das unidades de mapeamento variaram de 8,77 a 27,08.

Em cada ponto observado realizou-se a descrição morfológica de um perfil e coleta das amostras dos horizontes superficiais e subsuperficiais para análise. É

recomendado pela EMBRAPA (1995) que sejam descritos um perfil completo e um complementar por componente de unidade simples ou associações. No entanto, o número de observações, a área mínima mapeada e a escala de publicação ultrapassam o recomendado, superando até o sugerido para levantamentos ultradetalhados, discordando de Levantamento..., (1972), onde o número de observações foi menor do que o sugerido e IAC (1987) e Distrito Federal (1990) que realizaram o número de observações de acordo com EMBRAPA (1995).

TABELA 09 – NÚMERO DE OBSERVAÇÕES POR HECTARE E POR UNIDADE DE MAPEAMENTO

|       | nº de observações | Obs. / ha |
|-------|-------------------|-----------|
| LVd   | 8                 | 12,31     |
| CHd3  | 10                | 8,77      |
| CHd2  | 13                | 6,57      |
| LVAd  | 15                | 16,30     |
| CHd1  | 25                | 14,04     |
| CHd5  | 13                | 13,00     |
| CHa   | 11                | 8,09      |
| Chd4  | 13                | 27,08     |
| CXbd  | 13                | 9,70      |
| CHd6  | 14                | 16,87     |
| TOTAL | 135               | 12,88     |

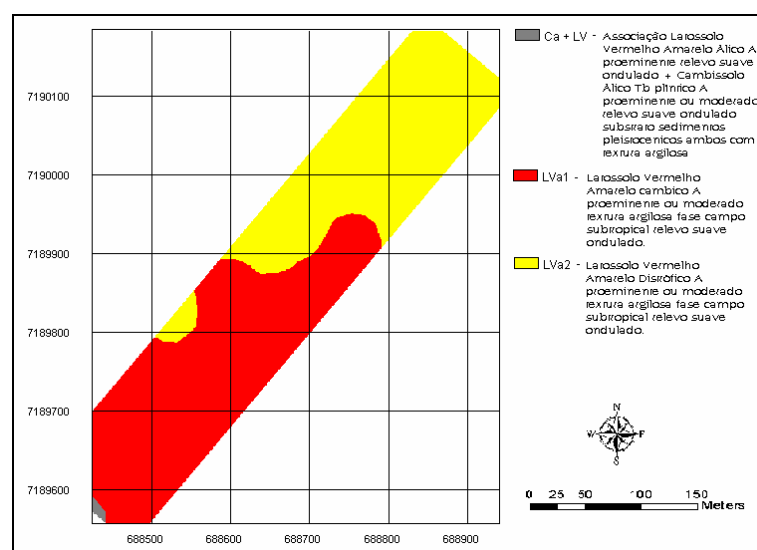
#### 4.5 COMPARATIVO DO MAPA DE SOLOS OBTIDO E O MAPA DE SOLOS DESENVOLVIDO A PARTIR DE MÉTODOS CONVENCIONAIS DE LEVANTAMENTO

A amostragem nos métodos convencionais é realizada através da abertura de um perfil por unidade de mapeamento no local mais representativo, sendo os dados adquiridos extrapolados para toda a área da unidade, resultando em alto grau de generalização, se comparado com a metodologia e número de observações utilizados neste trabalho.

Considerando os dados interpolados neste trabalho e analisados sobre as unidades de mapeamento do levantamento semidetalhado do Centro de Estações Experimentais do Cangüiri (1<sup>o</sup> aproximação), é possível observar a grande variabilidade dos atributos do solo, como descritos a seguir (Tabela 09).

As unidades de mapeamento que recobrem a área de estudo são as seguintes: unidade Ca + LV, associação de Latossolo Vermelho-Amarelo Álico A proeminente relevo suave ondulado + Cambissolo Álico Tb plíntico A proeminente ou moderado relevo suave ondulado substrato sedimentos pleistocênicos ambos com textura argilosa, unidade LVa1, Latossolos Vermelho-Amarelo Câmbico A proeminente ou moderado textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado e unidade LVa2, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico A proeminente ou moderado textura argilosa fase campo subtropical relevo suave ondulado (Figura 22).

FIGURA 22 – UNIDADES DE MAPEAMENTO DO LEVANTAMENTO SEMIDETALHADO REALIZADO POR MÉTODOS CONVENCIONAIS



Fonte: Rocha (1998).

A partir da análise estatística realizada sobre os atributos do solo (Tabela 10), percebe-se que as variações no interior destas unidades de mapeamento são maiores do que as variações encontradas no mapa realizado neste trabalho.

TABELA 10 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO DO LEVANTAMENTO POR MÉTODOS CONVENCIONAIS

|                |                  | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média  | Desvio padrão |
|----------------|------------------|--------------|--------------|--------|---------------|
| <b>Ca + LV</b> | Atividade Argila | 9,478        | 12,466       | 10,817 | 0,706         |
|                | Gradiente        | 1,341        | 1,580        | 1,432  | 0,063         |
|                | CTC              | 5,879        | 7,130        | 6,416  | 0,289         |
|                | m%               | 54,455       | 61,152       | 58,081 | 1,833         |
|                | Relação S/A      | 0,603        | 0,734        | 0,674  | 0,035         |
|                | V%               | 23,285       | 26,358       | 24,698 | 0,775         |
| <b>LVa1</b>    | Atividade Argila | 6,678        | 40,148       | 14,393 | 3,203         |
|                | Gradiente        | 0,746        | 2,303        | 1,139  | 0,131         |
|                | CTC              | 3,740        | 14,562       | 8,077  | 1,482         |
|                | m%               | 27,706       | 87,303       | 64,382 | 10,676        |
|                | Relação S/A      | 0,423        | 1,841        | 0,760  | 0,168         |
|                | V%               | 4,386        | 34,687       | 18,592 | 5,885         |
| <b>LVa2</b>    | Atividade Argila | 6,687        | 27,074       | 14,581 | 1,84          |
|                | Gradiente        | 0,800        | 1,485        | 1,116  | 0,064         |
|                | CTC              | 4,242        | 16,786       | 8,206  | 1,001         |
|                | m%               | 5,359        | 87,794       | 65,450 | 9,802         |
|                | Relação S/A      | 0,207        | 1,311        | 0,751  | 0,122         |
|                | V%               | 7,876        | 54,404       | 17,145 | 4,466         |

Ao analisar as variações contidas na unidade LVa1 constata-se a presença de atividade argila superior a 27cmol/kg, o que caracteriza Cambissolos, valores de gradiente textural acima de 1,5, que atendem os critérios para B textural, e valores de relação silte/argila muito superiores aos limites máximos (0,6) para caracterizar Latossolos.

A unidade LVa2 apresenta valores de atividade argila e gradiente textural muito próximos aos limites estabelecidos para os Latossolos. A relação silte/argila varia de 0,207 a 1,311, o que caracteriza Cambissolos e Latossolos; a saturação por bases varia de 7,876 a 54,404 indicando a presença de solos eutróficos e distróficos.

A unidade Ca + LV apresenta valores de atividade argila que contemplam Cambissolos e Latossolos e valores de gradiente textural que atendem os critérios para B textural. No entanto, os valores de saturação por alumínio, relação silte/argila e saturação por bases, apresentam baixas variações e atendem aos critérios para Cambissolos alumínicos. Esta baixa variação pode ser causada devido à reduzida extensão desta unidade de mapeamento.

Estas variações encontradas podem ser causadas pela presença de inclusões não descritas neste levantamento. Tal fato pode estar relacionado aos métodos convencionais de levantamento e classificação de solos, baseados principalmente na separação dos compartimentos geomorfológicos por meio da fotointerpretação,

estabelecendo correlação da ocorrência de diferentes tipos de solos com a posição na paisagem, não conseguindo diferenciar pequenas variações no interior destes compartimentos.

## 5 CONCLUSÕES

As técnicas de geoprocessamento permitiram a identificação das unidades taxonômicas e delimitação das unidades de mapeamento.

Os resultados obtidos da espacialização dos atributos do solo por krigagem permitem entender e visualizar a variabilidade destes atributos do solo.

A aplicação da análise booleana através dos critérios e parâmetros do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos é eficiente na identificação das unidades taxonômicas;

As técnicas utilizadas mostram ser possível informatizar o processo de mapeamento de solos, proporcionando mais velocidade e menos subjetividade na determinação dos limites das unidades de mapeamento.



## REFERÊNCIAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003.
- BIE, S. W.; BECKETT, P. H. T. Comparison of four independent soil surveys by airphoto interpretation Paphos Area (Cyprus). **Photogrammetria**, n. 29, p. 198-202, 1973.
- BIGARELLA, J. J. **Folha Geológica de Piraquara – XXIV 8**. Curitiba: Comissão da Carta Geológica do Paraná, 1967. 1 mapa: P/B; 70 x 60 cm. Escala 1:50.000.
- BISHOP, T. F. A.; McBRATNEY, A. B. A comparison of prediction methods for the creation of field-extend soil properties map. **Geoderma**, Sydney, v 103, p. 149-160, 2001.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul: primeira etapa, Planalto Rio-Grandense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 2. p. 71-209, 1967.
- BRASIL. Ministerio da Agricultura. **Levantamento semidetalhado dos solos de áreas do ministério da agricultura no Distrito Federal**. Rio de Janeiro, 1966. (Boletim Técnico, n. 8)
- CAMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 241 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.
- CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta**. Campinas, 2001. Disponível em: <http://www.cnptia.embrapa.br/modules/tinycontent3/content/2001/DOCUMENTO3int.pdf>. Acesso em: 01/10/2006.
- CAMARGO, M, N.; BENNEMA, J. Delineamento esquemático dos solos do Brasil. Separata de: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-54, 1966.
- CZAJKOWSKI, S.; LANDIM, P. M. B. Aplicação da análise estatística em levantamentos pedológicos semidetalhados. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 47, p. 155-166, 1999.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 31/01/2007.
- EMBRAPA. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta**. Campinas, SP: 2001.
- EMBRAPA. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos da margem esquerda do rio São Francisco estado da Bahia**. Recife, PE: Serviço Nacional de Levantamento e Classificação de Solos, 1976.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Serviço de Produção de Informação, 1999.

EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina, EMBRAPA; IAPAR, 1984. t. 1.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1995.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Andes: guide to GIS and image processing**. Worcester: Clark University Worcester, 2005.

FELIPE, R.S. et al; MEROPAR – Minerais do Paraná; SALAZAR JR, O. **Mapeamento geológico geotécnico a região do Alto Iguaçu**. Curitiba: Serviço Geológico e Pesquisa Mineral – MINEROPAR: COMEC, 1994.

FLORENSE CARRÉ; GIRARD, M. C. Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. **Geoderma**, Sydney, v 110, p. 241-263, 2002.

FONSECA, E. L.; RIZZI, R.; BOLFE, E. L.; COSTA, M. A. S. Uso do interpolador krigagem ordinária para a espacialização das propriedades físicas dos solos. In: SIMPÓSIO ANUAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 1., 2002, Aracajú. **Anais...** Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr1/pdfs/poster19.PDF>>. Acesso em: 10/01/2007.

BRASIL. Ministério do Interior. Superintendência do Vale do São Francisco. **Levantamento detalhado de solos e classificação de terras para fins de irrigação da área P-A-1 – Petrolina / PE**. S.l.: Geotécnica S. A., 1971.

GOODCHILD, M. F. Geographical data modeling. **Computers & Geosciences**, v.18, n. 4, p. 104-408, 1992.

GOOVAERTS, P. Geostatistic in soil science: state-of-the-art and perspectives, **Geoderma**, Michigan, v. 89, p. 1-45, 1999.

DISTRITO FEDERAL. Secretaria de agricultura e produção. **Levantamento semidetalhado dos solos**. Brasília: Fundação Zoobotânica do Distrito Federal, 1990.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Wageningen, v. 120, p. 75-93, 2004.

HOLZBERG, B. B. **Quantificação e tratamento das incertezas nas análises de estabilidade de poços de petróleo**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <[http://www.gtep.civ.puc-rio.br/img\\_banco/teses/Holzberg\\_01.pdf](http://www.gtep.civ.puc-rio.br/img_banco/teses/Holzberg_01.pdf)>. Acesso em: 22/01/2007.

IAC. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Levantamento pedológico detalhado e distribuição espacial de características dos solos do Pôlder registro – I, SP.** Campinas, 1978.

IMAI, N. N.; VICENTE, J.; LIMA, D. L.; TACHIBANA, V. M.; SILVA, E. A.; VOLL, E.; OLIVEIRA, H. E. S. **Análise comparativa na interpolação por krigagem ordinária e krigagem por indicação no caso de ervas daninhas em cultura de soja.** Disponível em: <[http://www.cartografia.org.br/xxi\\_cbc/232-SG50.pdf](http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/232-SG50.pdf)>. Acesso em: 12/01/2007.

JUANG, K.; CHEN, Y.; LEE, D. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, p. 229-238, 2004.

LE MOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LEVANTAMENTO de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.2, n. 1/2, p. 11-248, 1972.

LIMA, V. C. **Fundamentos de pedologia.** Curitiba: UFPR. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2004.

LAMPARELLI, R. A. C., ROCHA, J. V., BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações.** Guaíba: Agropecuária, 2001.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos.** São Paulo: Fundação editora da UNESP, 1997.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos.** Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/kindicativa.pdf>>. Acesso em: 25/10/2006.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná.** Curitiba: Banco de desenvolvimento do Paraná, 1968.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica do solos e relação com os teores de argila de um latossolo vermelho sob plantio direto de grãos no Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/ler/download/TEC%202004.10.pdf>>. Acesso em: 16/01/2007.

McBRATNEY, A. B. ; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Sydney, v 117, p. 3-52, 2003.

MEUL, M.; MEIRVENNE, M. V. Kriging soil texture under different types of nonstationarity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 112, p. 217-233, 2003.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts.** Baltimore, 2000.

MUNSELL COLOR UTILITIES. **Munsell conversion software – v.7.0.4.** Disponível em: <<http://livingstonmanor.net/Munsell/File%20Downloads.htm>>. Acesso em 22/01/07.

NOVAES FILHO, J. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 91-100, 2007.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 2. edição. Piracicaba: FEALQ, 2005.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado de estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos II. Memorial descritivo. Campinas: Instituto Agrônomo, 1984.

OLIVEIRA, J. B. et. al. **Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo**: quadrícula de Araras. Campinas: Instituto Agrônomo, 1982.

ORTIZ, J.L. **Mapeamento de produtividade dos atributos do solo e relevo e aplicação localizada de fertilizantes**. Disponível em: <<http://www.gpsglobal.com.br/Artigos/Agricola/Jonas.html>> Acesso: 20/05/07.

ROCHA, H. O. Levantamento pedológico semi-detalhado da fazenda experimental do Canguiri – 1ª aproximação. Curitiba, 1998. mapa: em cores; 83 x 59 cm. Escala 1:10.000.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para a distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2002.

RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1995.

SALAMUNI, E. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. Rio Claro, 1998. 211p. Tese (Doutorado em Geologia – Área de concentração em geologia regional), Universidade Estadual Paulista.

SANCHEZ, R. B.; MARQUEZ JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidades espacial de propriedades de latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005.

SILVA, M. M. Z. **Sistema de informações geo-referenciadas**: conceitos e fundamentos. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Editora IST Press, 2000.

VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S.; FUCKS, S. D. **Métodos geoestatísticos para análise e avaliação de riscos em agricultura de precisão**. Disponível em: <[www.geoinfo.info/geoinfo2001/papers/138ivanluis.pdf](http://www.geoinfo.info/geoinfo2001/papers/138ivanluis.pdf)>. Acesso em: 19/01/2007.

VICENTE, J.; LIMA, D. L.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA, H. E. S., IMAI, N. N.; TACHIBANA, V. M. Estudo comparativo entre krigagem linear e krigagem não linear para aplicação em agricultura de precisão. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, 2003, Curitiba. **Anais...** Disponível em: <[http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/GeoColoq\\_2003/artigos/T061.pdf](http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/GeoColoq_2003/artigos/T061.pdf)>. Acesso em 20/01/2007.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 1, p. 1-55, jul. 2000.